



## **Cartografia das Áreas Áridas de Portugal Continental com Recurso a Imagens SAR e Multiespectrais Sentinel-1 e Sentinel-2**

Tiago Miguel Vaz Antunes

**Mestrado em Engenharia Geográfica**

Trabalho de projeto orientado por:  
Prof. Doutor João Catalão Fernandes  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Navarro Ferreira



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar quero agradecer à Professora Ana Navarro pela orientação e pelo tempo disponibilizado no meu acompanhamento, mesmo em períodos de sobrelotação de trabalho mostrou-se sempre disponível para ajudar a ultrapassar as dificuldades que foram aparecendo ao longo deste projeto.

Agradeço ao Professor João Catalão pela sugestão do tema de trabalho, bastante interessante e desafiador e que desde o início se mostrou sempre disponível para ajudar e levar este trabalho a bom porto.

Agradeço ao Engenheiro Carlos Lima da Inforgeo por ter facultado o acesso às imagens do satélite SPOT-7 da zona de estudo.

Ao meu pai, José, à minha mãe, Odete, pelo apoio incondicional ao longo da minha formação académica que possibilitou concluir esta etapa, a minha mais profunda gratidão e reconhecimento.

Agradeço ao meu irmão, Nuno, amigo e quem admiro, que sempre me incentivou e ajudou.

Um obrigado especial à minha namorada Adriana Almeida. Por fazeres parte da minha vida e pelo teu apoio incondicional e incansável, sem ti isto não era possível. Por todo o amor, carinho, paciência e dedicação. Obrigado.

Por fim, aos meus colegas de curso que me acompanharam neste percurso académico, um agradecimento pela amizade e companheirismo.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.



## RESUMO

---

A representação cartográfica das áreas ardidas e respetiva extensão assume um papel bastante relevante como indicador de risco e para posterior prevenção, na medida em que permite assinalar e identificar áreas com particular suscetibilidade e sensibilidade, dando a conhecer os locais que deverão ser alvo de medidas mais assertivas de prevenção e combate. Deste modo, a utilização da deteção remota e dos sistemas de informação geográfica é essencial no estudo dos incêndios florestais, proporcionando uma visão mais abrangente do território no sentido da localização, delimitação, mitigação e prevenção dos mesmos. Este projeto visa a produção de cartografia das áreas ardidas da região centro de Portugal continental no ano de 2017, tendo como principal objetivo o desenvolvimento de uma metodologia que explore a complementaridade das imagens de micro-ondas e óticas adquiridas pelos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2. A metodologia desenvolvida tem como objetivo permitir uma identificação célere do perímetro ardido e facilitar o planeamento e intervenção, conjugando as sinergias entre os satélites acima mencionados. Para a delimitação dos perímetros de fogo e a respetiva área foram utilizadas duas abordagens: (1) a aplicação de limiares com base em índices de vegetação pré e pós-incêndio e (2) a classificação automática de imagens, recorrendo aos algoritmos de máxima verosimilhança e a redes neuronais com base em diferentes conjuntos de bandas gerados a partir das imagens Sentinel-1 e Sentinel-2. Os resultados de ambas as abordagens foram validados com base numa delimitação efetuada manualmente sobre uma imagem do satélite SPOT-7 e ainda com base nos valores de área ardida identificados pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). A delimitação da área ardida resultante da utilização de limiares aplicados a índices pré e pós-incêndio, calculados com base nas bandas do visível e do infravermelho próximo, foi a que apresentou uma maior exatidão global, tanto na análise comparativa com a delimitação com base na imagem do satélite SPOT-7, bem como com as áreas ardidas propostas pelo ICNF, produzindo valores de 94.31% e 89.13%, respetivamente. Relativamente aos resultados obtidos através da classificação das imagens dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, os melhores valores para a exatidão global e para o coeficiente kappa foram sempre obtidos com a junção dos dois tipos de imagem independentemente do algoritmo de utilização utilizado. Para todos os testes efetuados verificou-se sempre uma subestimação da área ardida e uma consequente sobrestimação da área não ardida comparativamente às áreas identificadas na imagem de maior resolução espacial (SPOT-7). A aplicação de uma rede neuronal a um conjunto de bandas com a diferença de índices de vegetação, baseados nas bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de onda curta, e a diferença das duas polarizações produziu os melhores resultados de exatidão global e coeficiente k, respetivamente 97.04% e 91.61%. Os resultados evidenciam que área ardida identificada pelo ICNF foi, de um modo geral, sobrestimada em cerca de 25.05% face à área delimitada visualmente com base na imagem do satélite SPOT-7, a qual foi considerada neste estudo como a verdade observada no terreno.

**Palavras-chave:** SPOT-7, Sentinel-1, Sentinel-2, ICNF, classificação automática de imagens, rede neuronal, máxima verosimilhança.



## ABSTRACT

---

The cartographic representation of burned areas and their extent plays a very important role as a risk indicator for subsequent prevention, as it allows to identify areas with particular susceptibility and sensitivity, showing the locations that should be the target for more assertive prevention and combat measures. Thus, the use of remote sensing and geographic information systems is essential for the study of forest fires, providing a more comprehensive view of the territory in terms of locating, delimiting, mitigating and preventing them. This project aims to elaborate the cartography of burned areas in central Portugal mainland in 2017, with the main objective of developing a methodology to explore the complementarity of SAR and optical images acquired by the Sentinel-1 and Sentinel-2 satellites. The developed methodology intends to allow a fast identification of the burned perimeter and to facilitate the planning and intervention, combining the synergies between the aforementioned satellites. Two approaches were used to define the fire perimeters and the respective area: (1) the application of thresholds based on pre- and post-fire indexes and (2) the automatic classification of images, using the maximum likelihood and neural network algorithms, based on different sets of bands generated from the Sentinel-1 and Sentinel-2 images. Results of both approaches were validated on the basis of a manually delimited SPOT-7 satellite image and also based on the burned area identified by the *Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas* (ICNF). For the first approach, results for the VIS+NIR spectral domain exhibited the highest overall accuracy, both when comparing with the SPOT-7 visual delimitation and the ICNF data, with a value of 94.31% and 88.93%, respectively. Regarding the second approach, using Sentinel-2 and Sentinel-1 images alone or together, the best overall accuracy and k-coefficient (97.04% and 91.61%, respectively) were always obtained when using the neural network based on the difference of indices and on both types of satellites images. Results show that the burned area identified by ICNF was generally overestimated by about 25,05% when compared with the burned area delimited visually and manually using the SPOT-7 satellite image (assumed to be the ground truth).

**Keywords:** SPOT-7, Sentinel-1, Sentinel-2, ICNF, automatic classification of images, neural network, maximum likelihood.





# ÍNDICE

---

|   |      |
|---|------|
| Resumo .....  | iii  |
| Abstract .....  | v    |
| Lista de Figuras .....  | ix   |
| Lista de Tabelas .....  | xi   |
| Lista de Acrónimos .....  | xiii |
| Capítulo 1 - Introdução.....  | 1    |
| 1.1. Enquadramento.....   | 1    |
| 1.2. Motivação e Objetivos.....   | 2    |
| 1.3. Estrutura da Tese .....  | 2    |
| Capítulo 2 - Estado da Arte .....   | 3    |
| 2.1. Mapeamento de áreas aridas.....  | 3    |
| Capítulo 3 - Dados e Métodos .....  | 6    |
| 3.1. Descrição da Área de Estudo.....   | 6    |
| 3.1.1. Condições Meteorológicas .....   | 8    |
| 3.2. Descrição dos Dados .....  | 9    |
| 3.2.1. Carta Administrativa Oficial de Portugal .....   | 10   |
| 3.2.2. Censos .....   | 10   |
| 3.2.3. Dados ICNF.....  | 11   |
| 3.2.4. SPOT ( <i>Satellite Pour L'Observation de la Terre</i> ).....                              | 12   |
| 3.2.5. Missão Sentinel .....  | 13   |
| 3.3. Metodologia Desenvolvida para a Cartografia de Áreas Aridas .....                            | 19   |
| 3.3.1. Identificação visual dos limites da área arida com base na imagem do satélite SPOT-7 ..... | 19   |
| 3.3.2. Produção das bandas para os algoritmos de classificação .....                              | 21   |
| 3.3.3. Aplicação de limiares com base nos índices pré e pós-incêndios .....                       | 23   |
| 3.3.4. Classificação automática das imagens.....  | 25   |
| 3.3.5. Validação das imagens classificadas .....  | 31   |
| Capítulo 4 - Resultados e Discussão .....   | 36   |
| 4.1. Área arida com base na imagem do satélite SPOT-7 .....                                       | 36   |
| 4.2. Validação com a Delimitação Executada na Imagem SPOT-7 .....                                 | 37   |
| 4.2.1. Limiares com base nos índices pré e pós-incêndios .....                                    | 37   |
| 4.2.2. Classificadores automáticos .....  | 39   |

|   |    |
|---|----|
| 4.3. Validação com os dados do ICNF .....                       | 43 |
| 4.3.1. Limiares com base nos índices pré e pós-incêndios .....  | 43 |
| 4.3.2. Classificadores automáticos .....                        | 45 |
| 4.4. Comparação das áreas ardidas da imagem SPOT-7 e ICNF ..... | 48 |
| 4.5. Aferição das áreas ardidas .....                           | 49 |
| Capítulo 5 - Conclusões .....                                   | 51 |
| 5.1. Perspetivas Futuras .....                                  | 52 |
| Referências .....   | 53 |
| Anexo A .....   | 56 |
| Anexo B .....   | 60 |

## LISTA DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1:</b> Enquadramento geográfico da área de estudo .....   | 7  |
| <b>Figura 2:</b> Evolução diária da temperatura do ar de 1 a 30 de junho de 2017 em Portugal Continental. (Tmax, Tmed e Tmin designam, respetivamente, temperatura máxima, média e mínima), extraído de IPMA boletim climatológico de junho de 2017. .... | 8  |
| <b>Figura 3:</b> Onda de calor em junho de 2017 (a), distribuição espacial da precipitação total (b) e respetiva percentagem em relação à média em junho (c), extraído de IPMA boletim climatológico de junho de 2017. ....                               | 9  |
| <b>Figura 4:</b> Representação espacial da área ardida em 2017 calculada pelo ICNF.....   | 11 |
| <b>Figura 5:</b> Imagem SPOT-7 com data de 23 de junho de 2017(pós-fogo). ....  | 13 |
| <b>Figura 6:</b> Imagens Sentinel-2A de 4 de junho (pré-fogo) (a) e 4 de julho de 2017(pós-fogo) (b). ....  | 18 |
| <b>Figura 7:</b> Representação esquemática do processo de delimitação da área ardida e das áreas de treino. ..  | 19 |
| <b>Figura 8:</b> Representação da área ardida e ilhas, delimitadas manualmente. ....  | 20 |
| <b>Figura 9:</b> Representação das áreas de treino, delimitadas manualmente. ....   | 21 |
| <b>Figura 10:</b> Representação esquemática do processo de obtenção das razões e diferenças de índices. ....  | 23 |
| <b>Figura 11:</b> Representação esquemática do processo de obtenção das áreas ardidas dos limiares com base nos índices pré e pós-incêndios. ....   | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Representação esquemática dos tipos de classificação de imagens.....  | 25 |
| <b>Figura 13:</b> Princípio de classificação máxima verosimilhança (Fonte: Naumann 2008). ....  | 26 |
| <b>Figura 14:</b> Representação de uma rede neuronal (Fonte: Naumann. 2008). ....   | 28 |
| <b>Figura 15:</b> Representação esquemática do processo de obtenção das imagens classificadas filtradas. ....   | 31 |
| <b>Figura 16:</b> Representação de Matriz Confusão. ....  | 32 |
| <b>Figura 17:</b> Representação esquemática do processo de obtenção das matrizes de confusão. ....  | 34 |
| <b>Figura 18:</b> Representação esquemática do processo de obtenção das áreas ardidas. ....   | 35 |
| <b>Figura 19:</b> Área ardida delimitada manualmente com base na imagem do satélite SPOT-7. ....  | 36 |
| <b>Figura 20:</b> Representação espacial da área ardida delimitada manualmente e a área ardida do VIS+NIR. ....   | 39 |
| <b>Figura 21:</b> Representação espacial da área ardida calculada pelo ICNF e a área ardida do VIS+NIR. ....  | 45 |
| <b>Figura 22:</b> Representação espacial da área ardida calculada pelo ICNF e a área ardida detetada pelo algoritmo máxima verosimilhança. ....   | 46 |
| <b>Figura 23:</b> Representação espacial da área ardida calculada pelo ICNF e a área ardida detetada pelo algoritmo rede neuronal.....  | 47 |
| <b>Figura 24:</b> Comparação entre as áreas ardidas resultantes da melhor classificação automática (Teste.3.5), da área ardida calculada pelo ICNF, da delimitação manual da área ardida na imagem SPOT-7 com a imagem SPOT-7 (Zona 1). ....              | 49 |
| <b>Figura 25:</b> Comparação entre as áreas ardidas resultantes da melhor classificação automática (Teste.3.5), da área ardida calculada pelo ICNF, da delimitação manual da área ardida na imagem SPOT-7 com a imagem SPOT-7 (Zona 2). ....              | 50 |
| <b>Figura 26:</b> Imagem captada pelo satélite SPOT-7 da área de estudo. ....   | 56 |
| <b>Figura 27:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0_VH) da área de interesse de dia 13 de junho de 2017. ....  | 56 |
| <b>Figura 28:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0_VV) da área de interesse de dia 13 de junho de 2017. ....  | 57 |
| <b>Figura 29:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0_VH) da área de interesse de dia 13 de julho de 2017. ....  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 30:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0_VV) da área de interesse de dia 13 de julho de 2017..... | 58 |
| <b>Figura 31:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-2A da área de interesse de dia 4 de junho de 2017. ....             | 58 |
| <b>Figura 32:</b> Imagem captada pelo satélite Sentinel-2A da área de interesse de dia 4 de julho de 2017. ....             | 59 |

## LISTA DE TABELAS

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1:</b> Identificação dos distritos, concelhos, população residente, área ardida e área total para 2017 ..   | 7  |
| <b>Tabela 2:</b> Proveniência dos dados, respetivo formato e sistemas de referência .....   | 9  |
| <b>Tabela 3:</b> Especificações dos satélites SPOT-6 e SPOT-7 .....   | 12 |
| <b>Tabela 4:</b> Descrição das bandas espectrais do satélite Sentinel-2. ....   | 17 |
| <b>Tabela 5:</b> Quantidade de áreas de treino e respetivas classes .....   | 20 |
| <b>Tabela 6:</b> Nomenclatura dos conjuntos de índices .....  | 26 |
| <b>Tabela 7:</b> Nomenclatura dos testes de máxima verosimilhança efetuados .....   | 27 |
| <b>Tabela 8:</b> Valores dos parâmetros nos testes efetuados recorrendo a uma rede neuronal. ....   | 29 |
| <b>Tabela 9:</b> Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-2. ....  | 30 |
| <b>Tabela 10:</b> Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-1. ....   | 30 |
| <b>Tabela 11:</b> Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1 .....  | 30 |
| <b>Tabela 12:</b> Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR (áreas em ha). ....  | 37 |
| <b>Tabela 13:</b> Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR+1SWIR (áreas em ha). ....  | 37 |
| <b>Tabela 14:</b> Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR+2SWIR (áreas em ha). ....  | 38 |
| <b>Tabela 15:</b> Valores de exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e resultados derivados dos limiares com base nos índices pré e pós-fogo. .... | 38 |
| <b>Tabela 16:</b> Valores dos três melhores testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....                               | 40 |
| <b>Tabela 17:</b> Valores dos testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1 .....   | 40 |
| <b>Tabela 18:</b> Valores dos três melhores testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. ....                  | 41 |
| <b>Tabela 19:</b> Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....                                       | 41 |
| <b>Tabela 20:</b> Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1 .....                                       | 42 |
| <b>Tabela 21:</b> Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. ....                          | 42 |
| <b>Tabela 22:</b> Matriz confusão entre os do ICNF e VIS+NIR (áreas em ha). ....  | 43 |
| <b>Tabela 23:</b> Matriz confusão entre os dados do ICNF e VIS+NIR+1SWIR (áreas em ha). ....  | 43 |
| <b>Tabela 24:</b> Matriz confusão entre os dados do ICNF e VIS+NIR+2SWIR (áreas em ha). ....  | 44 |
| <b>Tabela 25:</b> Valores de exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e resultados derivados dos limiares com base nos índices pré e pós-fogo. ....               | 44 |
| <b>Tabela 26:</b> Matriz confusão entre os dados do ICNF e os dados resultantes do algoritmo máxima verosimilhança (áreas em ha). ....  | 45 |
| <b>Tabela 27:</b> Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e os resultados derivados do algoritmo máxima verosimilhança. ....             | 46 |
| <b>Tabela 28:</b> Matriz confusão entre os dados do ICNF e os dados resultantes do algoritmo rede neuronal (áreas em ha). ....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 29:</b> Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e os resultados derivados do algoritmo rede neuronal.....                              | 47 |
| <b>Tabela 30:</b> Matriz confusão dos dados provenientes do ICNF com a delimitação efetuada na imagem SPOT-7 (áreas em ha). .....   | 48 |
| <b>Tabela 31:</b> Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados provenientes do ICNF com a delimitação efetuada na imagem SPOT-7. ....                         | 48 |
| <b>Tabela 32:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....                  | 60 |
| <b>Tabela 33:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....              | 61 |
| <b>Tabela 34:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1. ....                  | 61 |
| <b>Tabela 35:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1. ....              | 62 |
| <b>Tabela 36:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. ....     | 62 |
| <b>Tabela 37:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. .... | 63 |
| <b>Tabela 38:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....                          | 64 |
| <b>Tabela 39:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2. ....                      | 65 |
| <b>Tabela 40:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1. ....                          | 66 |
| <b>Tabela 41:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1. ....                      | 66 |
| <b>Tabela 42:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. ....             | 67 |
| <b>Tabela 43:</b> Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1. ....         | 68 |

## LISTA DE ACRÓNIMOS

---

|       |  |
|-------|--|
| BAI   | MODIS Burned Area Index                              |
| BOA   | Bottom Of Atmosphere                                 |
| CAOP  | Carta Administrativa Oficial de Portugal             |
| Clre  | Clorofila  |
| CNES  | Centre National d'Etudes Spatiales                   |
| C-SAR | Synthetic Aperture Radar                             |
| DGT   | Direção-Geral do Território                          |
| DR    | Deteção Remota                                       |
| ESA   | Agência Espacial Europeia                            |
| ETRS  | European Terrestrial Reference System                |
| EW    | Extra Wide Swath                                     |
| GEMI  | Global Environmental Monitoring Index                |
| GNDVI | Green Normalized Difference Vegetation Index         |
| GNR   | Guarda Nacional Republicana                          |
| GRD   | Ground Range Detected                                |
| GSD   | Ground Sample Distance                               |
| HRS   | High-Resolution Stereoscopic                         |
| ICNF  | Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas |
| INE   | Instituto Nacional de Estatística                    |
| IPMA  | Instituto Português do Mar e da Atmosfera            |
| IW    | Interferometric Wide Swath                           |
| LUT   | Look up Table  |
| MDE   | Modelo Digital de Elevação                           |
| MIRBI | Mid Infrared Burned Index                            |
| MSI   | MultiSpectral Instrument                             |
| NBR   | Normalized Burned Ratio                              |
| NDVI  | Normalized Difference Vegetation Index               |

|       |  |
|-------|--|
| NHL   | Number of Hidden Layers                  |
| NIR   | Near Infrared                            |
| NTI   | Number of Training Iterations            |
| ONU   | Organização das Nações Unidas            |
| RBR   | Relativized Burn Ratio                   |
| RMSEC | Root Mean Square Exit Criteria           |
| SLC   | Single Look Complex                      |
| SM    | Stripmap                                 |
| SPOT  | Satellite Pour L’Observation de la Terre |
| SR    | Simple Ratio                             |
| SWIR  | Shortwave Infrared                       |
| TM    | Transversa de Mercator                   |
| TOA   | TOP of Atmosphere                        |
| TR    | Training Rates                           |
| TTC   | Training Threshold Contribution          |
| EU    | União Europeia                           |
| VIS   | Visível                                  |
| WV    | Wave                                     |



## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

---

### 1.1. ENQUADRAMENTO

Os incêndios rurais constituem um sério problema na degradação dos ecossistemas a nível global. Portugal, particularmente, tem sofrido amplamente os efeitos dos mesmos, apresentando-se o ano de 2017 como um dos mais severos de que há registo. Em termos de área ardida, é importante salientar que se esta ultrapassar os 100 ha, o incêndio passa a ser classificado como grande incêndio. Em 2017 registaram-se 214 incêndios desta categoria, responsáveis por 93% da totalidade da área ardida, enfatizando a severidade e destruição causada pelos mesmos.

Os valores de área ardida ultrapassaram os 440 mil hectares, constituindo o valor mais elevado registado desde 2007 (cerca de quatro vezes superior). A grande ocorrência e severidade dos incêndios no ano referido resultou num número trágico de perda de vidas humanas, ascendendo a mais de uma centena. No que concerne à área ardida em termos distritais, Coimbra foi o distrito mais afetado, com 113 839 ha, correspondentes a cerca de 26% da área do mesmo. O distrito da Guarda também foi bastante afetado com uma perda de 60 038 ha (14% do total), seguido de Castelo Branco com 52 721 ha (12% do total) [ICNF, 2017]. Em termos de espécies arbóreas, o pinheiro bravo e o eucalipto são as que têm sido mais afetadas, representando um valor de 76% da área florestal ardida. Tal tem contribuído significativamente para a redução da área de pinheiro bravo e para o aumento considerável da área de matos [APA, 2017].

A Guarda Nacional Republicana – Serviço de Proteção da Natureza e do Ambiente (GNR/SEPNA) investigou 12 229 ocorrências (70% do total), sendo que em 4 346 não foi possível apurar a causalidade dos incêndios. Do universo das ocorrências investigadas e com causa apurada, 43% foram associadas a comportamentos negligentes, essencialmente queimadas. 23% das ignições foram originadas por motivações como o vandalismo e outros comportamentos semelhantes, enquadrados na classe do incendiarismo [APA, 2017].

A representação cartográfica das áreas ardidas e respetiva extensão assume um papel bastante relevante como indicador de risco e posterior prevenção, na medida em que permite assinalar e identificar áreas com particular suscetibilidade e sensibilidade, dando a conhecer os locais que deverão ser alvo de medidas mais assertivas de prevenção e combate. A cartografia das áreas ardidas pode também auxiliar na elaboração de projetos de arborização das áreas, os quais podem ser realizados de acordo com o respetivo grau de risco de incêndio, permitindo uma adequação de estruturas e de espécies vegetais.

Deste modo, a utilização da deteção remota (DR) e dos sistemas de informação geográfica (SIG) é essencial ao estudo dos incêndios rurais, proporcionando uma visão mais abrangente do território no sentido da localização, delimitação, mitigação e prevenção dos mesmos. Em termos de metodologia e dados disponíveis para análise, a existência de bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de onda curta possibilita a perceção das áreas ardidas existentes, devido à diferença entre os sinais espectrais da vegetação ardida e não ardida. Não obstante, os dados sobre as áreas ardidas podem ser obtidos através de índices de vegetação que permitem compreender e quantificar a gravidade do incêndio.

## **1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS**

No contexto apresentado anteriormente, surge a necessidade de uma deteção rápida e automática das áreas ardidas proporcionando uma intervenção imediata após os incêndios, tanto a nível de ações de avaliação de prejuízos, como a nível de recuperação e de indemnizações.

O projeto desenvolvido visa elaborar a cartografia das áreas ardidas na região centro de Portugal continental no ano de 2017, tendo como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia que explore a complementaridade das imagens de micro-ondas e óticas adquiridas pelos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, permitindo a produção de cartografia de áreas ardidas. Deste modo, foi desenvolvida uma metodologia para permitir a delimitação célere da área ardida, conjugando as sinergias entre o Sentinel-1 e o Sentinel-2.

Para tal, e sabendo que os índices de vegetação fornecem informação de particular interesse para as zonas de vegetação, testaram-se vários índices e adotaram-se diferentes abordagens de classificação de modo a aferir e analisar as que ofereciam melhores resultados para esta finalidade.

## **1.3. ESTRUTURA DA TESE**

A presente tese encontra-se estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, bem como são apresentados os principais objetivos e motivação para a elaboração do projeto. O capítulo 2 sumariza o estado da arte, dando especial enfoque aos conceitos essenciais descritos ao longo do documento. Estes estão relacionados com a obtenção dos dados, as metodologias mais usuais no mapeamento de áreas ardidas, bem como os principais índices e as abordagens de classificação mais utilizadas.

De seguida, no capítulo 3, são descritos os dados utilizados e a metodologia desenvolvida. Este inclui uma descrição e caracterização pormenorizada da área de estudo, bem como do procedimento adotado para o mapeamento das áreas ardidas, descrevendo detalhadamente os índices de vegetação e os métodos de classificação utilizados. Adicionalmente, é apresentado o procedimento seguido para efetuar a comparação com os dados da área ardida fornecidos pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). O capítulo 4 apresenta os resultados essenciais do projeto desenvolvido, bem como a sua discussão. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do estudo e são tecidas algumas perspetivas futuras para a deteção e mapeamento das áreas ardidas.

## Capítulo 2 - ESTADO DA ARTE

---

Os incêndios representam um risco natural bastante significativo, tendo como consequências a perda de vidas humanas e animais, propriedades, infraestruturas, destruição da paisagem, entre outros. As atividades antropogénicas assumem um papel preponderante e impactante nas condições naturais do fogo através da supressão de incêndios naturais ou do aumento das ignições.

Usualmente, admite-se que os regimes de fogos naturais surgem e implicam condições de equilíbrio. Contudo, as alterações causadas nos ecossistemas conduzem a impactos negativos nos mesmos. As complexidades sociais, espaciais e temporais dos desafios da gestão dos incêndios muitas vezes sobrecarregam as atuais estratégias e instituições de conservação, que aplicam conceitos desatualizados [Pyne, 1997]. Neste âmbito e considerando a necessidade de métodos mais eficientes na deteção e estudo dos fogos rurais, a DR tem vindo a assumir um papel muito relevante nas últimas décadas, oferecendo uma visão mais abrangente do território em análise e por ser uma ferramenta com grande relevância na localização, delimitação e prevenção de incêndios. Deste modo, as técnicas de DR proporcionam uma forma alternativa para detetar a variabilidade espacial e temporal dos efeitos dos incêndios, representando menores custos e menos tempo despendido, quando comparadas com as técnicas mais tradicionais de inventários de campo [Lentile *et al.*, 2006].

Na identificação de áreas áridas, recorrendo a dados de DR, são utilizados dois tipos de abordagem: as baseadas em alterações da refletância causadas pelos efeitos do incêndio (alteração da cor das folhas e solo, entre outros) e as baseadas no contraste térmico de incêndios ativos. Considera-se que a abordagem que tem como base as alterações de refletância garante maior confiabilidade dado que estas são mais subtis que as alterações de irradiação térmica que sofre grandes flutuações com o aumento da temperatura.

### 2.1. MAPEAMENTO DE ÁREAS ÁRIDAS

As estimativas dos efeitos dos incêndios na química da atmosfera são usualmente baseadas na quantidade de biomassa consumida, sendo necessário um mapeamento preciso das áreas áridas, bem como o conhecimento da biomassa existente antes do incêndio. As áreas áridas são relativamente simples de discriminar visualmente, no entanto, apresentam uma grande complexidade para a sua deteção automática devido às variações espectrais e temporais causadas pela severidade do incêndio, o tempo decorrido desde a sua extinção e o tipo de vegetação existente. Para tal, são utilizados os sensores dos satélites cujos dados digitais são recolhidos a partir da área coberta em forma de pontos de imagem individuais, os píxeis. O tamanho do píxel é dependente do tipo de sensor e determina a resolução espacial da imagem que pode ser baixa (maior que 30 metros por píxel), média (de 2 a 30 metros por píxel) ou alta (menor que 2 metros por píxel). Os satélites de média resolução como os da missão Landsat são utilizados para a observação da superfície da terra, tendo utilidade há mais de 30 anos na observação da desflorestação.

Estes sensores de média resolução são tipicamente utilizados em estudos de escala local, mas recentemente têm sido utilizados também em estudos à escala global, tanto pelas restrições impostas pelo protocolo de Quioto, como pela maior disponibilidade das imagens, especialmente após o histórico de imagens do Landsat se encontrar acessível ao domínio público. Os dados provenientes dos satélites, especialmente dos Landsat e Sentinel-2, têm vindo a assumir-se como uma chave para mapear áreas afetadas pelos incêndios com elevada precisão e quase imediatamente após a ocorrência dos mesmos (tanto em termos da área árida como em termos do nível de severidade).

Os incêndios consomem vegetação, destroem clorofila, deixam os solos a nu e alteram o seu teor de humidade. Os decréscimos na clorofila conduzem a alterações nos comprimentos de onda nas regiões do visível, do limiar do vermelho (*Red-Edge*) e do infravermelho próximo (*Near Infrared*, *NIR*). A maioria dos estudos no âmbito da severidade dos incêndios são baseados em dados adquiridos nas regiões espectrais do vermelho, do infravermelho próximo (*NIR*) e do infravermelho de onda curta (*SWIR*). O estudo conduzido por Chuvieco *et al.* (2002) demonstrou que os índices baseados na região das bandas do vermelho e do *NIR*, tais como o índice de vegetação da diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, *NDVI*) aumentam a sua correlação com a severidade do incêndio quando se utiliza a parte superior da banda vermelha (*Red-Edge*).

O instrumento multiespectral (*MSI*) a bordo dos satélites Sentinel-2 recolhe dados da vegetação no domínio espectral do limiar do vermelho, sendo um dos melhores descritores do conteúdo de clorofila existentes, permitindo avaliar os índices para discriminação das áreas ardidas e a respetiva severidade [Curran *et al.*, 1990].

A maioria dos algoritmos existentes para esta finalidade visa encontrar um equilíbrio entre a redução das falsas deteções (erros de comissão) e o aumento da taxa de deteção (erros de omissão). Em algumas publicações, os algoritmos propostos são ajustados às condições locais obtendo-se resultados razoáveis para a área de estudo em causa. Contudo, não são totalmente aplicáveis se o estudo for estendido para outros locais com características distintas. Em diversos estudos, tais como Chuvieco *et al.* (2006) e Giglio *et al.* (2009), foram desenvolvidos algoritmos para imagens com baixas resoluções (500 m), visando obter abordagens mais robustas e, simultaneamente, tendo em consideração a grande variedade de condições do local do incêndio. Estes algoritmos oferecem uma ampla diversidade de erros de comissão e omissão para diferentes ecossistemas.

Escuin *et al.* (2008) analisaram a capacidade dos índices *NBR* (*Normalized Burned Ratio*) e *NDVI* do Landsat TM/EM para a análise da severidade de áreas ardidas no sul de Espanha. Os autores utilizaram os índices numa perspetiva uni-temporal (pós-fogo) e bi-temporal (pré e pós-fogo) e aferiram que a forma mais precisa de analisar a severidade por segmentação dos índices era discriminar entre píxeis queimados e não queimados de acordo com os seus valores de *NBR* pré-existent, e subsequentemente, fazer a distinção entre píxeis com severidade moderada e extrema com base nos valores *NBR* pós-fogo.

Utilizando dados do satélite Sentinel-2, Fernández-Manso *et al.* (2016), desenvolveram um projeto com o objetivo de analisar a precisão destes dados para quantificar a severidade dos incêndios em ecossistemas mediterrânicos, sendo o primeiro trabalho a relacionar imagens do Sentinel-2 com o mapeamento de áreas ardidas. Os autores pretenderam também avaliar o potencial das bandas espectrais do limiar do vermelho de modo a determinar quais os índices mais adequados para discriminar os níveis de severidade dos incêndios. A metodologia seguida utilizou diversos índices de entre os quais se destacam os de referência: o *NDVI*, o *NBR*, o *GNDVI* (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), o *SR* (*Simple Ratio*) e o índice de diferença de vegetação (*Difference Vegetation Index*, *DVI*). Adicionalmente, os autores utilizaram o *NDVI Red-Edge 1* (*NDVI<sub>re1</sub>*) e o *NDVI Red-Edge 2* (*NDVI<sub>re2</sub>*), que diferem do anterior usando a banda do limiar do vermelho em vez da banda *NIR*, entre outros índices que permitem estimar o conteúdo de clorofila com maior precisão.

As conclusões deste estudo sugerem que os índices espectrais do limiar do vermelho baseados nas bandas B5, B7 e B8 do Sentinel-2 são os mais adequados para a discriminação da severidade das áreas queimadas, com especial ênfase para o índice espectral criado para estimar o conteúdo de clorofila (*CI<sub>re</sub>*). Os resultados

evidenciaram que o NDVI origina correlações mais fracas com a severidade das áreas ardidas quando comparada com a versão baseada em comprimentos de onda na região do limiar do vermelho. Os autores aferiram que os índices espectrais mais adequados para este tipo de análise são os baseados na banda B5, limiar do vermelho próximo de comprimentos de onda no vermelho, associados essencialmente a variações no conteúdo de clorofila. Relativamente à variação das estruturas das folhas, os índices mais adequados são os que se baseiam nas bandas do limiar do vermelho próximo (B7) e do NIR (B8). Uma das conclusões mais relevantes do estudo aponta que os dados provenientes do Sentinel-2, que detém resoluções espectrais, espaciais e temporais mais elevadas que o Landsat-8 (uma referência nos estudos de severidade de incêndios), podem contribuir para avaliar com elevada exatidão os danos dos incêndios e melhorar a adequação das estratégias de combate aos mesmos.

Ainda no âmbito do mapeamento de áreas ardidas, Quintano *et al.* (2018) desenvolveram um estudo com objetivo de validar a utilização combinada de dados provenientes do Sentinel-2 (com uma resolução espacial de 10-20 metros) com o Landsat-8 (com resolução de 30 metros), comparando com dados provenientes apenas do Landsat-8. Esta foi a primeira metodologia desenvolvida analisando conjuntamente dados do Sentinel-2 e Landsat-8 que avalia os danos provocados por incêndios em ecossistemas mediterrânicos. A metodologia desenvolvida pelos autores baseou-se na utilização de imagens numa escala 1:10000 pré e pós-fogo do satélite Landsat-8, para as quais se calcularam as diferenças do índice dNBR, o dNBR relativo (RdNBR) e o NBR relativo (RBR). Um procedimento análogo foi seguido para as imagens do Sentinel-2. Os mapas de severidade das áreas queimadas foram obtidos através das imagens dNBR, RdNBR e RBR, aplicando os limites recomendados por Key & Benson (2006).

Os resultados evidenciaram que as diferenças entre os mapas das áreas ardidas (com dados provenientes apenas do Landsat-8 e com a combinação deste com o Sentinel-2), se verificaram particularmente em locais de baixa severidade do incêndio e em classes não ardidas, conduzindo a alguns problemas de não classificação nestes níveis. Tendo em conta níveis de elevada severidade das áreas ardidas, os mapas já revelam grande similaridade. Os mapas baseados exclusivamente em dados do Landsat-8 obtiveram exatidões superiores (com valores para o coeficiente kappa de 0.80) comparativamente aos obtidos através da combinação do Landsat-8 com o Sentinel-2 (com valores para o coeficiente kappa de 0.70). Contudo, o mapeamento das áreas ardidas através da combinação de dados do Landsat-8 e Sentinel-2 poderá ser útil como uma ferramenta preliminar de auxílio servindo como uma aproximação inicial do nível de danos causados, visto que apresentou um nível de precisão bastante aceitável.

## Capítulo 3 - DADOS E MÉTODOS

---

### 3.1. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesta secção será feito um breve enquadramento da área de estudo, referindo as características mais relevantes como a vegetação, a densidade populacional, a dimensão da área envolvida, as condições meteorológicas verificadas na mesma e uma síntese dos efeitos que o incêndio provocou, tanto a nível económico como social.

O incêndio rural objeto de estudo neste trabalho, incide sobre o famigerado incêndio de Pedrogão Grande. Este teve o seu início no dia 17 de junho de 2017, no concelho de Pedrogão Grande, distrito de Leiria, tendo-se alastrado aos concelhos limítrofes. A propagação deste incêndio alastrou-se até aos concelhos de Castanheira de Pêra, Figueiró dos Vinhos, Ansião, Sertã, Pampilhosa da Serra e Penela (Tabela 1).

Neste mesmo dia houve a deflagração de outro incêndio que tomou grandes proporções, no concelho de Góis, acabando por se alastrar ao concelho de Pampilhosa da Serra já assolado por uma frente do incêndio de Pedrogão Grande. Durante os três dias seguintes, estes dois incêndios continuaram a lavar incessantemente, sendo que no dia 20 de junho uma das frentes do incêndio de Pedrogão Grande juntou-se ao incêndio de Góis, gerando uma área ardida contígua, tendo-se extinguido no dia 26 de junho de 2017.

Dada as proporções desta calamidade, registaram-se perdas humanas, tendo-se contabilizado oficialmente 66 mortos, dos quais 65 civis e 1 bombeiro voluntário, havendo a ocorrência de 254 feridos dos quais 7 em estado grave. Em termos de prejuízos materiais, foram contabilizadas mais de 500 casas destruídas parcial ou totalmente. Houve o registo de 48 empresas afetadas diretamente pelo incêndio, pondo em causa cerca de 372 postos de trabalho. A estimativa provisória do montante total dos prejuízos ascende a 500 milhões de euros, sendo que este desastre provocou o maior incêndio rural de sempre em Portugal, e foi considerado o mais mortífero da história do país.

A área considerada neste estudo abrange as áreas ardidas na região centro de Portugal Continental no ano de 2017, abrangendo mais concretamente os distritos de Leiria, Coimbra e Castelo Branco. Nestes distritos, os concelhos efetivamente afetados foram: Ansião (1), Alvaiázere (2), Figueiró dos Vinhos (3), Pedrogão Grande (4), Castanheira de Pêra (5), Sertã (6), Penela (7), Góis (8), Pampilhosa da Serra (9). A Figura 1 ilustra a região mencionada, bem como o seu enquadramento geográfico. Recorrendo à informação contida nos ficheiros da cartografia nacional de áreas ardidas produzida pelo ICNF para o ano de 2017, foi possível retirar informação relativa à dimensão da área ardida por concelho.

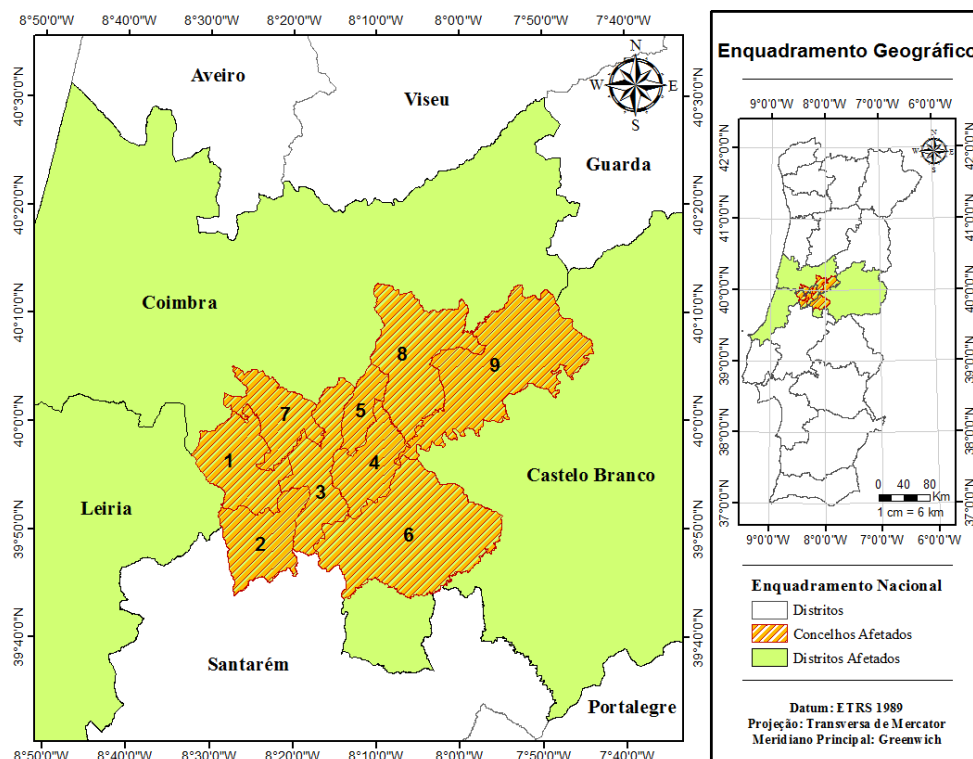


Figura 1: Enquadramento geográfico da área de estudo

A Tabela 1 sintetiza a informação sobre a área ardida, a população residente e a área de cada concelho anteriormente representados espacialmente na Figura 1, para o período entre 17 e 26 de junho de 2017. Segundo estes dados, houve um total de 48 083.30 hectares de área ardida distribuída por nove concelhos, sendo o município de Figueiró dos Vinhos, no distrito de Leiria, o que obteve uma maior área ardida de 10 578.28 hectares, neste período temporal.

Tabela 1: Identificação dos distritos, concelhos, população residente, área ardida e área total para 2017

| Distritos      | Concelhos           | População Residente | Área Ardida ICNF (ha) | Área Total do Concelho (ha) |
|----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Leiria         | Ansião              | 12 512              | 252.85                | 17 998                      |
|                | Alvaiázere          | 6 842               | 451.01                | 16 047                      |
|                | Figueiró dos Vinhos | 5 784               | 10 578.18             | 17 340                      |
|                | Pedrogão Grande     | 3 539               | 9 761.55              | 12 880                      |
|                | Castanheira de Pêra | 2 769               | 3 560.85              | 6 686                       |
| Castelo Branco | Sertão              | 15 074              | 4 269.44              | 44 670                      |
| Coimbra        | Penela              | 5 584               | 1 809.91              | 13 480                      |
|                | Góis                | 3 961               | 9 543.30              | 26 330                      |
|                | Pampilhosa da Serra | 4 128               | 7 856.19              | 39 650                      |
| <b>3</b>       | <b>9</b>            | <b>60 193</b>       | <b>48 083.30</b>      | <b>195 081</b>              |

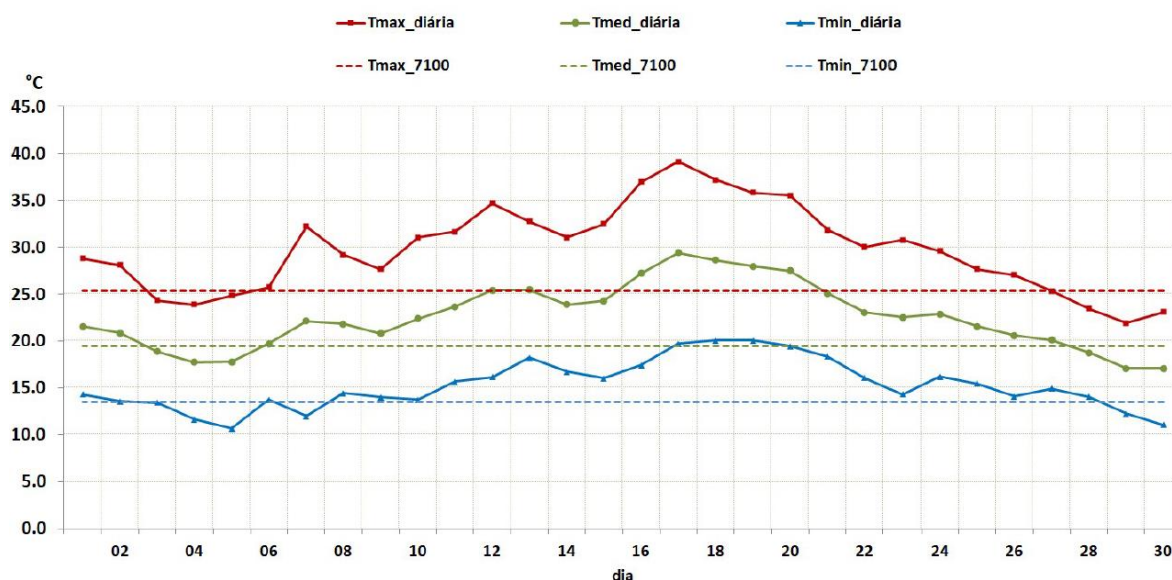
Relativamente à floresta desta região, esta era constituída no passado por espécies como o carvalho-das-beiras (*Quercus pyrenaica*), o carvalho-português (*Quercus faginea*), o carvalho-roble (*Quercus robur*), o castanheiro (*Castanea sativa*), a azinheira (*Quercus ilex*), o sobreiro (*Quercus suber*), o medronheiro (*Arbutus unedo*), a oliveira (*Olea europaea*) [ICNF, 2013]. Devido aos constantes incêndios rurais verificados ao longo dos anos, à ausência de uma política de ordenamento e gestão florestal e ao abate de árvores por diversos fatores, estas espécies entraram em declínio.

Com a redução das espécies mencionadas anteriormente, houve um aumento exponencial de novas espécies. Dentro destas espécies encontram-se as nativas como o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) e as exóticas como o eucalipto (*Eucalyptus*). Desta forma, as espécies atualmente predominantes na região, são o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) e em segundo lugar o eucalipto (*Eucalyptus*) [ICNF, 2013].

### 3.1.1. Condições Meteorológicas

O mês de junho de 2017 em Portugal Continental foi extremamente seco e quente sendo o terceiro mês de junho mais quente desde 1931, com um valor médio da temperatura do ar de 22.34°C, 2.92°C acima do valor normal no período de 1971 a 2000.

Como se pode observar na Figura 2, em mais de 90% das estações meteorológicas observaram-se, no período de 16 a 19 de junho, valores de temperatura máxima iguais ou superiores a 30°C. No dia 17, cerca de 85% das estações registaram valores de temperatura máxima iguais ou superiores a 35°C. Para o mesmo dia, 50% das estações meteorológicas registaram valores de temperatura máxima iguais ou superiores a 40°C. Relativamente às temperaturas mínimas, nos dias 17, 18 e 19, mais de 50% das estações meteorológicas registaram valores iguais ou superiores a 20°C.



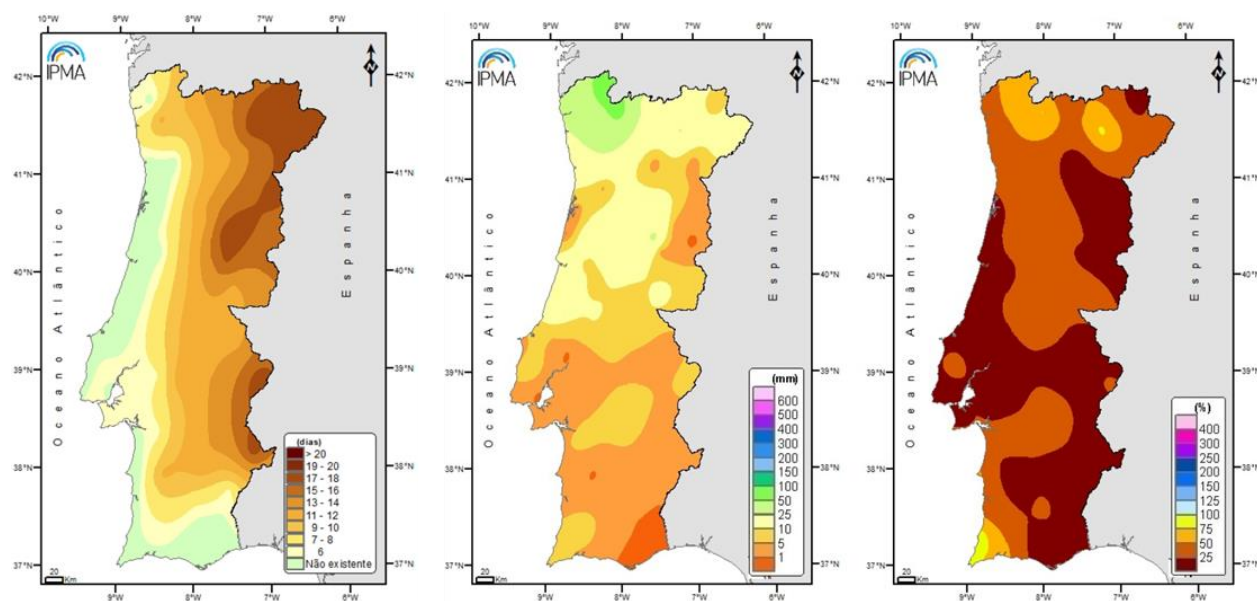
**Figura 2:** Evolução diária da temperatura do ar de 1 a 30 de junho de 2017 em Portugal Continental. (Tmax, Tmed e Tmin designam, respetivamente, temperatura máxima, média e mínima), extraído de IPMA boletim climatológico de junho de 2017.



Verificou-se também a existência de uma onda de calor no período de 7 a 24 de junho nas regiões interior Norte e Centro. Na maioria das regiões litorais tal não se verificou, como se pode observar na Figura 3a.

Em termos de precipitação, o mês de junho foi classificado como muito seco, registando um valor de 9.6 mm correspondente a 30% do valor médio. Nas Figuras 3b e 3c apresenta-se a distribuição espacial da precipitação total e respetiva percentagem em relação à média (1971-2000) em junho. Em termos espaciais os valores da percentagem de precipitação em relação ao valor médio no período 1971-2000 foram inferiores a 50% em quase todo o território, sendo mesmo inferior a 25% em muito locais do interior Centro e Sul e no litoral da região Centro.

No final de junho, cerca de 80% do território estava em situação de seca, correspondendo cerca de 72.3% a seca severa e 7.3% a seca extrema. De acordo com o índice meteorológico de seca PDSI, a situação de seca agravou-se comparativamente aos valores registados até 31 de maio [IPMA, 2017].



**Figura 3:** Onda de calor em junho de 2017 (a), distribuição espacial da precipitação total (b) e respetiva percentagem em relação à média em junho (c), extraído de IPMA boletim climatológico de junho de 2017.

### 3.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS

Para a elaboração deste projeto foi necessário proceder à aquisição de dados de diversas plataformas. As fontes dos dados, bem como os respetivos formatos encontram-se sintetizados na Tabela 2 e no Anexo A.

**Tabela 2:** Proveniência dos dados, respetivo formato e sistemas de referência

| Dados  | Discriminação                    | Fonte dos Dados  | Data | Formato Digital | Sistemas de Referência |
|--------|----------------------------------|--|------|-----------------|------------------------|
| CAOP   | Áreas Administrativas            | Direção-Geral do Território (DGT)  | 2017 | Vetorial        | PT-TM06/ ETRS89        |
| CENSOS | População Residente              | PORDATA<br><a href="https://www.pordata.pt/Home">https://www.pordata.pt/Home</a> | 2011 | PDF             | -----                  |
| ICNF   | Área Árida calculada pelo ICNF   | Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas                             | 2017 | Vetorial        | PT-TM06/ ETRS89        |
|        | 2º e 10º relatório provisório de |  |      | PDF             | -----                  |

| incêndios florestais de 2017 |                        |   |            |           |                       |
|------------------------------|------------------------|---|------------|-----------|-----------------------|
| SPOT                         | Imagem ótica           | Infogeo   | 23/06/2017 | Matricial | GCS WGS 1984          |
| Sentinel-2                   | Imagens óticas         | Agência Espacial Europeia (ESA)   | 04/06/2017 | Matricial | WGS84<br>UTM zona 29N |
|                              |                        | <a href="https://scihub.copernicus.eu">https://scihub.copernicus.eu</a> | 04/07/2017 |           |                       |
| Sentinel-1                   | Imagens de micro-ondas | Agência Espacial Europeia (ESA)   | 13/06/2017 | Matricial | WGS84                 |
|                              |                        | <a href="https://scihub.copernicus.eu">https://scihub.copernicus.eu</a> | 13/07/2017 |           |                       |

### 3.2.1. Carta Administrativa Oficial de Portugal

A Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP), versão 2017, contém a delimitação e demarcação das circunscrições administrativas do país. O único organismo reconhecido por lei com competências para alterar e fixar os limites administrativos contidos neste ficheiro é a Assembleia da República. A entidade responsável pela execução e manutenção da CAOP é a Direção-Geral do Território (DGT).

Este ficheiro foi descarregado do site da DGT e apresenta os limites administrativos dos distritos, dos concelhos e das freguesias em formato vetorial, estabelecidos no sistema de referência PT-TM06/ETRS89 [DGT, 2018].

### 3.2.2. Censos

Os censos são recenseamentos da população e habitação, sendo referidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), como as operações estatísticas mais complexas e dispendiosas que um país pode realizar. Segundo os Princípios e Recomendações da ONU (2017), os Censos devem ser entendidos como processos normalizados de recolha, tratamento, avaliação, análise e difusão de dados referenciados a um momento temporal específico e respeitantes a todas as unidades estatísticas de uma área geográfica bem delimitada, geralmente o país.

As normas internacionais indicam cinco princípios base dos Censos:

- Recenseamento individualizado: os Censos implicam que cada unidade estatística seja recenseada individualmente e que as suas características sejam registadas separadamente;
- Universalidade dentro de um território definido: os Censos devem cobrir um território preciso, no nosso caso todo o país;
- Simultaneidade: cada unidade estatística deve ser recenseada, considerando quanto possível o mesmo momento de referência;
- Periodicidade definida: os Censos devem ser realizados em intervalos de tempo regulares;
- Disponibilidade de dados para as pequenas áreas estatísticas.

Em Portugal foram realizados ao todo catorze recenseamentos da população e quatro recenseamentos da habitação, segundo as recomendações internacionais, os últimos Censos em Portugal tiveram lugar em 2011 [INE, 2018].

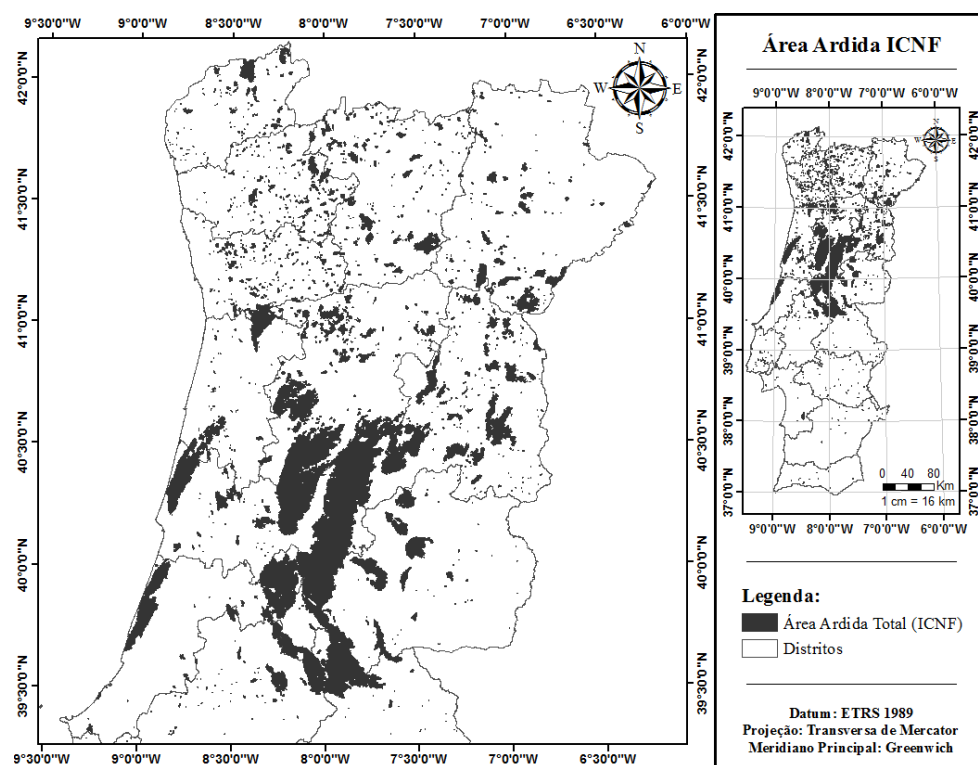
Através da Base de Dados de Portugal Contemporâneo (PORDATA), foi possível aceder a dados relativos a 2017, relativamente à população residente e à área de cada concelho, informação contida na Tabela 1.

### 3.2.3. Dados ICNF

Segundo os relatórios provisórios de incêndios rurais publicados pelo ICNF, entre 1 de janeiro e 31 de outubro de 2017, houve um total de 16 981 ocorrências dando origem a 3 653 incêndios florestais e 13 328 fogachos. Estas ignições tiveram como consequência 442 418 ha de área ardida de zonas florestais, 264 951 ha de povoamentos e 177 467 ha de matos, em todo o território nacional.

Relativamente ao histórico dos 10 anos anteriores, 2017 registou menos 3.6% de ocorrências e mais 428% de área ardida relativamente à média anual desses mesmos anos. Sendo o ano com o valor mais elevado de área ardida desde 2007 [ICNF, 2017].

A Figura 4 representa as áreas ardidas atualizadas à data de 31 de outubro de 2017, cartografadas através de imagens do satélite MODIS (contendo uma resolução espacial de 250 metros) pelo Sistema Europeu de Informação de Incêndios Florestais do Centro de Investigação Comum da Comissão Europeia (EFFIS-JRC/CE) conjugada com informação cartográfica obtida por outros satélites com melhor resolução, tais como o Sentinel e o Landsat. É importante salientar que a área ardida calculada pelo ICNF foi cartografada através de imagens da missão Copernicus, onde se pode observar que em termos nacionais as áreas mais afetadas foram as regiões norte e centro principalmente.



**Figura 4:** Representação espacial da área ardida em 2017 calculada pelo ICNF.

### 3.2.4. SPOT (*Satellite Pour L'Observation de la Terre*)

A missão SPOT foi iniciada com o lançamento do satélite SPOT-1 pela Agência Espacial Francesa (*Centre National d'Études Spatiales*, CNES), em 1986, em parceria com a Bélgica e a Suécia tendo sido desativado em 1990. Atualmente, encontra-se na sua sétima missão (SPOT-7), colocado em órbita em junho de 2014. Ao longo das diversas missões, foram surgindo desenvolvimentos na tecnologia dos satélites, tendo como exemplo a introdução do instrumento de vegetação no SPOT-4 lançado em 1998. Este tinha a capacidade de cobrir praticamente a totalidade da superfície terrestre diariamente, devido ao seu tamanho de faixa de 2 250 km, capturando a luz refletida em quatro bandas espectrais (azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio), esteve ao serviço durante 15 anos, sendo que em 2013 deixou de funcionar. Ainda contemplando as melhorias de funcionalidades destes satélites, o SPOT-5 lançado em 2002 adicionou o sensor HRS (*High-Resolution Stereoscopic*).

Em 2012 foi lançado o SPOT-6 e em 2014 foi posto em órbita o SPOT-7, idêntico ao anterior. Estes têm como missão dar continuidade ao serviço prestado pelos satélites SPOT-4 e SPOT-5, tendo sido projetados de modo a melhorar o desempenho relativamente às missões SPOT anteriores. O SPOT-7 funciona em constelação com o SPOT-6, à semelhança do Sentinel-2A e B, permitindo taxas de revisita mais próximas, capaz de proporcionar revisitas diárias em toda a superfície terrestre cobrindo um total de 6 milhões de km<sup>2</sup> por dia.

Estes produzem duas tipologias de imagens óticas de alta resolução: multiespectrais e pancromáticas. As imagens multiespectrais situam-se nas bandas do verde, vermelho, e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. As imagens pancromáticas são obtidas através de uma única banda larga na região do visível, com maior resolução espacial permitindo uma resolução de 1.5 m para um mapeamento topográfico à escala de 1:25 000. As especificações de ambos os satélites encontram-se na Tabela 3 [Gisgeography, 2018].

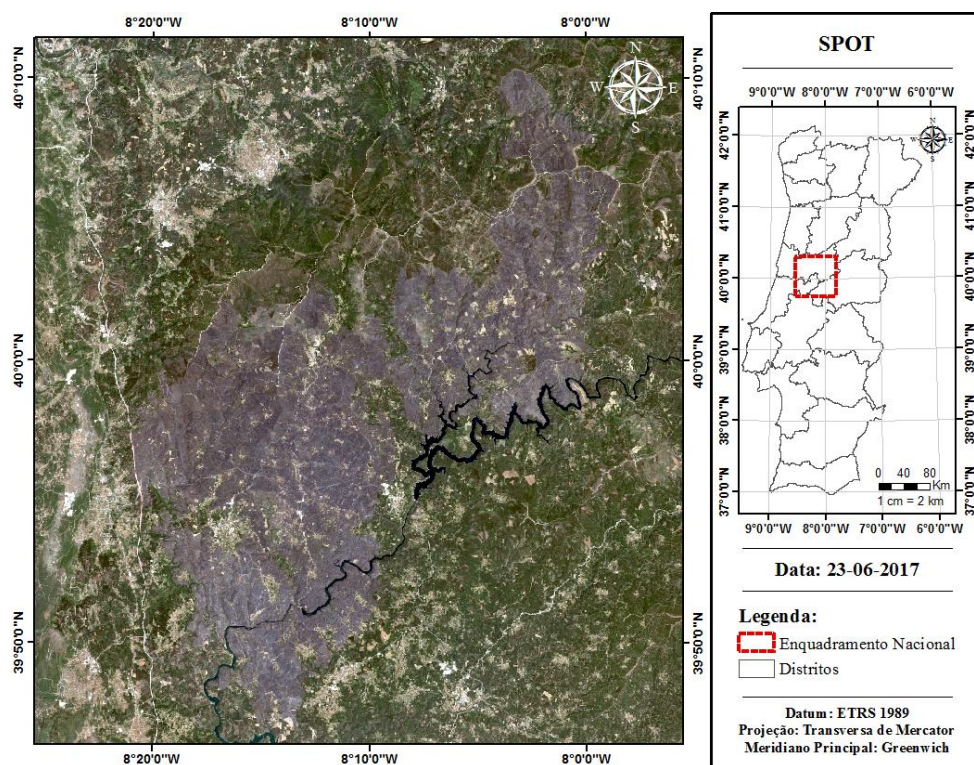
**Tabela 3:** Especificações dos satélites SPOT-6 e SPOT-7.

| Especificações                   | SPOT-6   | SPOT-7     |
|----------------------------------|--|------------|
| <b>Data de Lançamento</b>        | 09/09/2012   | 30/06/2014 |
| <b>Veículo de Lançamento</b>     | PSLV   |            |
| <b>Localização de Lançamento</b> | Centro Espacial Satish Dhawan (Índia)                              |            |
| <b>Imagem Multiespectral</b>     | Azul (0.455 $\mu\text{m}$ - 0.525 $\mu\text{m}$ )                  |            |
|                                  | Verde (0.530 $\mu\text{m}$ - 0.590 $\mu\text{m}$ )                 |            |
|                                  | Vermelho (0.625 $\mu\text{m}$ - 0.695 $\mu\text{m}$ )              |            |
|                                  | Infravermelho Próximo (0.760 $\mu\text{m}$ - 0.890 $\mu\text{m}$ ) |            |
| <b>Resolução (GSD)</b>           | Pancromático: 1.5 m  |            |
|                                  | Multiespectral: 6.0 m (B, G, R, NIR)                               |            |
| <b>Faixa de Imagem</b>           | 60 km no Nadir   |            |

Em suma esta missão apresenta diversas aplicações como a monitorização de vegetação, o planeamento do uso do solo, a monitorização ambiental e da agricultura e a gestão de recursos naturais.

Neste trabalho foi utilizada uma imagem do satélite SPOT-7 adquirida no dia 23 de junho de 2017. A aquisição desta imagem nesta data teve como objetivo captar a verdade do terreno no período imediatamente após o incêndio se ter extinguido (Figura 5). Desta forma é possível evitar folhagem que possa crescer posteriormente ao incêndio e assim obter com uma maior exatidão a extensão da área ardida.

Esta imagem permitiu fazer a delimitação por interpretação visual da área ardida, que depois serviu para validar os resultados obtidos. Devido à sua resolução e ao seu detalhe, esta imagem foi também usada para a definição das áreas de treino. A esta imagem não foi necessário fazer nenhum pré-processamento, apenas se aplicou uma composição colorida falsa cor e uma composição colorida de cor verdadeira, que serviu para efeitos de visualização, para melhor detetar a mancha ardida.



**Figura 5:** Imagem SPOT-7 com data de 23 de junho de 2017(pós-fogo).

### 3.2.5. Missão Sentinel

Os satélites da missão Sentinel são um conjunto de famílias de satélites que integram uma frota projetada especificamente para fornecer dados e imagens fundamentais para o programa Copernicus da Comissão Europeia. Este programa de monitorização ambiental tem vindo a realizar uma mudança gradual na forma da gestão ambiental e dos efeitos das alterações climáticas. O projeto encontra-se dividido em missões (da 1 à 5), sendo que para este trabalho apenas as missões Sentinel-1 e 2 apresentam relevância.

### 3.2.5.1 Sentinel-1

O primeiro da série, o Sentinel-1, apresenta uma órbita quase polar e é constituído por um instrumento de radar avançado com vista a fornecer imagens da superfície terrestre numa base diária. O *C-Synthetic Aperture Radar* (C-SAR) baseia-se nos sistemas SAR Canadianos e da ESA (ERS-1, ERS-2, Envisat e Radarsat). O Sentinel-1 transmite dados para estações terrestres em todo o mundo para uma rápida disseminação da informação, tendo capacidade de recolha de dados durante 24 horas, sob quaisquer condições meteorológicas.

A vantagem do Sentinel-1 é o radar que o incorpora, permitindo visualizar a superfície da Terra através de chuva e nuvens, independentemente de ser dia ou noite e tornando-se particularmente útil para monitorizar áreas com longos períodos de escuridão [ESA, 2018]. Como principal objetivo esta missão centra-se então na monitorização de meios terrestres e marinhos, zonas de gelo no mar e ambiente ártico. Contempla também serviços relacionados com segurança marítima, nomeadamente deteção de navios, suporte à gestão de emergências (e.g. derrames de petróleo) e cartografia de apoio a atividades de ajuda humanitária. Dado que o tempo de aquisição e disponibilização de dados é muito diminuto (menos de uma hora), é bastante útil na gestão de emergências.

A missão Sentinel-1 foi projetada para ser uma constelação de dois satélites, sendo constituída pelo Sentinel-1A, lançado a 3 de abril de 2014, e pelo Sentinel-1B a 25 de Abril de 2016. Estes orbitam a Terra a uma altitude de 700 km, desta forma é possível obter um tempo de revisita global de seis dias. Sendo que no equador a periodicidade é de três dias, no Canadá e na Europa têm uma cobertura inferior a três dias.

O radar do Sentinel-1 tem a possibilidade de operar em quatro modos: *Interferometric Wide Swath* (IW), *Extra Wide Swath* (EW), *Wave* (WV) e *Stripmap* (SM).

- IW é o modo padrão usado sobre a terra, tem uma largura de faixa de 250 km e uma resolução de 5x20 m, o feixe de radar varre três vezes para trás e para a frente dentro de uma faixa, o que permite obter uma imagem homogénea ao longo da faixa e com uma qualidade superior;
- WV permite determinar a direção, o comprimento e a altura das ondas nos oceanos, com uma resolução de 20x20 km;
- SM fornece dados contínuos do ERS e do Envisat, com uma resolução de 5x5 m e uma largura de faixa de 80 km;
- EW destina-se a serviços operacionais marítimos, em zonas de gelo ou polares, onde é necessária uma cobertura e tempos de revisita curtos. Este modo é semelhante ao IW, só que em vez de usar três sub-faixas, utiliza cinco sub-faixas, que resultam numa resolução de 20x40 m.

Estes modos permitem vários esquemas de polarização. O modo WV dispõe de polarização única (VV ou VH), para os modos restantes é possível uma polarização dupla (VV+VH ou HH+HV) ou polarização simples (HH ou VV).

Destes modos resultam produtos de diferentes níveis:

- Os produtos de nível-0 são a base a partir do qual os restantes produtos de alto nível são produzidos. Estes dados estão em bruto e compactados.



- Existem dois tipos de produtos de nível-1:
  - *Single Look Complex* (SLC) são dados focalizados e georreferenciados que utilizam dados de órbita e altitude do satélite, fornecidos em geometria de alcance inclinado que é a coordenada natural de observação do alcance do radar, é definida como a linha de visão do radar para cada objeto refletido. Estes produtos usam a totalidade do sinal disponível da largura de banda, bem como amostras complexas que contêm números reais e imaginários, preservando a informação da fase.
  - *Ground Range Detected* (GRD) consistem em dados SAR detetados através de múltiplas aparições e são projetados usando o modelo elipsoidal WGS84. A projeção do elipsoide nos produtos GRD é corrigida usando a altura do terreno, que pode variar em azimuth, mas é constante em distância. A amplitude detetada representa os valores do píxel e a informação da fase é perdida. Os produtos GRD são reamostrados com uma distância de amostragem de solo constante (habitualmente em inglês referido como GSD) de 10 metros, 20 metros e 60 metros de acordo com a resolução nativa das diferentes bandas espectrais. As imagens GRD têm o formato do píxel quadrado ao contrário das SLC onde o píxel é retangular [ESA, 2018].

A obtenção dos produtos do satélite Sentinel-1 foi feita através do Copernicus Open Access Hub [ESA, 2018]. O sítio indicado permite o acesso aos dados provenientes do programa Copernicus. Os produtos usados neste trabalho foram os GRD.

Para trabalhar com estas imagens foi necessário executar o seu pré-processamento. A primeira fase consistiu na aplicação de um operador de correção de ruído térmico (*Thermal Noise Removal*). Este operador executa uma correção que é aplicada geralmente a ambos os produtos, SLC e GRD de nível-1. Estes produtos fornecem uma tabela de pesquisa de ruído (LUT) para cada conjunto de dados medidos. Os valores na LUT, representados em potência linear, podem ser usados para derivar perfis de ruído calibrados que correspondam aos dados GRD calibrados. É usada uma interpolação bi-linear para quaisquer píxeis que se encontrem entre os pontos das LUT [ESRI, 2018].

O processamento tradicional dos dados SAR que tem como produto imagens de nível-1, não inclui correções radiométricas. Deste modo, é fundamental aplicar uma correção radiométrica às imagens SAR de forma a que os valores dos píxeis das imagens, representem verdadeiramente a imagem radar resultante da superfície refletora. Esta correção é essencial para efetuar a comparação de imagens SAR obtidas com diferentes sensores, ou que tenham sido adquiridas através do mesmo sensor, mas em momentos temporais diferentes, de diferentes modos, ou processadas por diferentes processadores.

Este operador permite a realização de três tipos de calibrações diferentes: *Sigma nought*, *Beta nought* e *Gamma*. A calibração *Sigma nought* calibra a retrodispersão que retorna à antena proveniente de uma área no solo, e está diretamente relacionada com a distância ao solo. Este tipo de calibração permite interpretar a dispersão e reflexão da superfície e as propriedades da mesma, bem como comparar diretamente imagens de radar que foram detetadas pelo mesmo sensor ou por sensores diferentes. A calibração *Beta nought* consiste na razão entre a potência transmitida pela antena e a que é recebida pela mesma, produzindo um conjunto de dados que contêm o coeficiente de brilho do radar. Está correlacionada com o alcance inclinado e é adimensional. A calibração *Gamma* é tradicionalmente usada para calibrar a antena, onde é determinado o padrão da antena no conjunto de dados de saída. Neste pré-processamento foi utilizada a calibração *Sigma nought*. A calibração radiométrica é aplicada pela equação (1).

$$value(i) = \frac{|DN_i|^2}{A_i^2} \quad (1)$$

Onde:

- DN representa o valor de cada píxel;
- A representa os valores extraídos da LUT para Beta, Sigma e Gamma.

Os valores de *value* (i) e de  $A_i$  podem ser retirados de (2) e (3), respetivamente.

$$value(i) = \text{one of } \beta_i^0, \sigma^0, \text{ or } \gamma, \text{ or original } DN_i \quad (2)$$

$$A_i = \text{one of } \beta Nought(i), \sigma Nought t(i), \gamma(i) \text{ or } dn(i) \quad (3)$$

Após terminar o processo de calibração, procedeu-se à aplicação de um operador de filtro *Speckle*. O *Speckle* é um tipo de ruído de alta frequência que surge em dados provenientes de sistemas de radar de abertura sintética (SAR). Estas imagens são sujeitas a efeitos de manchas derivados do processamento de sinais dispersos e à interferência de ondas eletromagnéticas espalhadas por superfícies ou por objetos. Como consequência existe uma degradação da qualidade da imagem dificultando a interpretação de certas características. Esta função suaviza o ruído, mantendo as arestas ou limites nítidos na imagem. Apesar de existirem várias técnicas de filtragem de redução de ruído, foi decidido utilizar a técnica Lee com um tamanho de filtro 5x5. O filtro Lee aplica um filtro espacial a cada píxel contido numa imagem, onde filtra os dados com base nas estatísticas locais de uma janela quadrada. O valor do píxel central é então substituído por um valor calculado com base nos píxeis vizinhos.

Após a execução do operador de filtro foi observado que as imagens resultantes não se encontravam corretamente orientadas, contendo também algumas distorções espaciais. Foi então necessário efetuar uma correção geométrica. A explicação para este fenómeno está relacionada com as variações topográficas do terreno e também com a inclinação do sensor do satélite. Os dados que não estão diretamente no nadir da localização do sensor terão algumas distorções, o resultado que advém deste fenómeno são distâncias distorcidas nas imagens SAR. Para corrigir esta distorção foi aplicado o operador de correção de terreno *Range Doppler*, tem como função corrigir estas distorções fazendo com que a imagem se assemelhe o mais possível à realidade do terreno.

Como os dois produtos utilizados têm épocas temporais de deteção diferentes, por vezes as imagens resultantes desses produtos não têm o mesmo número de linhas e colunas. Neste caso em concreto, a imagem de 13 de junho de 2017 tem uma dimensão de 10431x5188, já a imagem de 13 de julho de 2017 apresenta uma dimensão de 10431x5187. Deste modo, para se efetuar posteriores processamentos usando estes dois produtos, é necessário e conveniente que as imagens contenham as mesmas dimensões. Para se corrigir esta discrepância de dimensões foi utilizado um operador geométrico, a ferramenta de colocação (*Collocation*). Esta ferramenta permite sobrepor espacialmente dois produtos, fazendo com que os valores de píxel de um produto sejam reamostrados para a imagem geográfica do outro. Ao produto que irá ser corrigido dá-se o nome de escravo, enquanto que o produto de referência se designa por mestre. Para estabelecer um mapeamento entre as diferentes amostras, mestre e escravo, a posição geográfica da amostra mestra é usada para encontrar a amostra correspondente na matriz escrava [Harris Geospatial Solutions, 2018].



### 3.2.5.2 Sentinel-2

O Sentinel-2 tem uma órbita quase polar e dispõe de um sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) que permite obter imagens multiespectrais de alta resolução com 13 bandas espectrais (443 nm - 2190 nm) descritas na Tabela 4. A resolução radiométrica também depende da relação sinal/ruído (SNR) do detetor, também descrito na mesma tabela. As resoluções espaciais de 10 m (3 bandas do visível e 1 banda de infravermelho próximo), 20 m (3 bandas de limiar do vermelho, 1 banda no infravermelho próximo e 2 bandas de infravermelho de onda curta) e 60 m (3 bandas de correção atmosférica) permitem obter uma nova perspectiva da Terra, com maior enfoque na vegetação. A combinação da alta resolução, novas capacidades espectrais, uma largura de faixa de 290 km e tempos de revisita frequentes, oferecem visões sem precedentes do planeta Terra.

**Tabela 4:** Descrição das bandas espectrais do satélite Sentinel-2.

| Banda | Resolução Espacial (m) | Comprimento de onda (μm) | Designação                  | SNR |
|-------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----|
| 1     | 60                     | 443                      | Coastal aerossol            | 129 |
| 2     | 10                     | 490                      | Azul                        | 154 |
| 3     | 10                     | 560                      | Verde                       | 168 |
| 4     | 10                     | 665                      | Vermelho                    | 142 |
| 5     | 20                     | 705                      | Vegetation Red Edge         | 117 |
| 6     | 20                     | 740                      | Vegetation Red Edge         | 89  |
| 7     | 20                     | 783                      | Vegetation Red Edge         | 105 |
| 8     | 10                     | 842                      | Infravermelho próximo (NIR) | 174 |
| 8a    | 20                     | 865                      | Vegetation Red Edge         | 72  |
| 9     | 60                     | 940                      | Vapor de água               | 114 |
| 10    | 60                     | 1.375                    | SWIR - cirrus               | 50  |
| 11    | 20                     | 1.610                    | SWIR 1                      | 100 |
| 12    | 20                     | 2.190                    | SWIR 2                      | 100 |

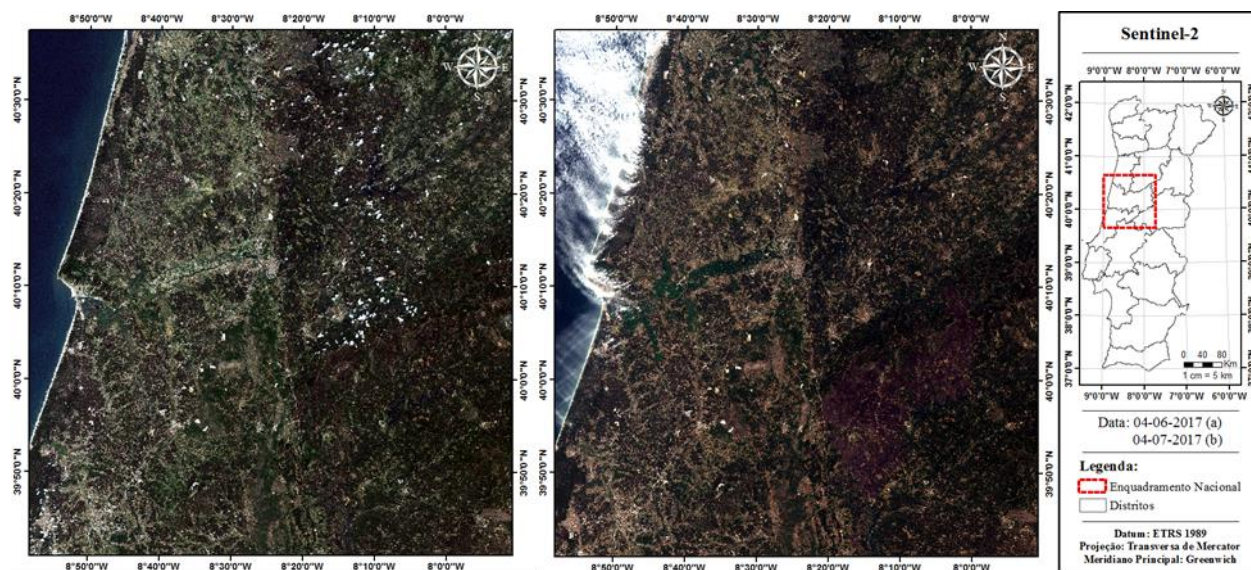
A missão é baseada na constelação de dois satélites idênticos na mesma órbita, separados 180 graus visando uma cobertura ótima e fornece essencialmente informações acerca de práticas agrícolas e florestais, podendo também auxiliar na gestão da segurança alimentar. Os dois satélites em conjunto cobrem toda a superfície continental (incluindo cursos de água existentes), entre a latitude 56° sul e 84° norte, todas as águas costeiras até 20 km da costa, todas as ilhas da União Europeia (UE), ilhas maiores que 100 km<sup>2</sup>, mar mediterrâneo e ainda é possível realizar observações de acordo com os pedidos dos estados membros (e.g. Antártida, Baffin Bay). [ESA, 2018].

Com estes dois satélites, todas as áreas mencionadas anteriormente são revisitadas a cada cinco dias. As imagens provenientes podem ser utilizadas para determinar inúmeros índices, tais como o índice de clorofila da área foliar bem como índices de conteúdo de água nas plantas, entre outros. Com as imagens multiespectrais e a ampla cobertura, a missão Sentinel-2 oferece continuidade e expande as missões SPOT e Landsat. Os dois satélites da missão Sentinel-2, o 2-A e 2-B, são propriedade da Comissão Europeia e foram lançados a 23 de junho de 2015 e 7 de março de 2017, respetivamente.

Os produtos provenientes do Sentinel-2 são de nível-1C que resulta da aplicação de um modelo digital de elevação (MDE) para projetar a imagem obtida em geometria cartográfica. O resultado é uma orto-imagem na projeção UTM/WGS84, onde as coordenadas píxel são referentes ao canto superior esquerdo da imagem.

Embora tenha sido efetuado o descarregamento de imagens de nível-2, foi possível notar que as imagens apresentavam alguns problemas radiométricos. Visto que têm sido reportados por vários utilizadores problemas nesta matéria, a ESA disponibiliza um processador chamado Sen2Cor que possibilita a geração e formatação de produtos Sentinel-2 nível-2A. Este programa realiza a correção atmosférica, de terreno e de *cirrus* dos dados de nível-1 *Top Of Atmosphere* (TOA) e cria imagens com refletâncias corrigidas da *Bottom Of Atmosphere* (BOA). Como este programa é um protótipo, e dado que a qualidade da correção ainda está a ser avaliada pela comunidade científica, neste estudo não foram utilizadas as imagens de nível-2, mas sim as de nível-1. Como as imagens de nível-1 foram descarregadas com a correção ao TOA assumiu-se que os efeitos da atmosfera estavam harmonizados nas duas imagens e não foi efetuado mais nenhum tipo de pré-processamento às mesmas. As medições radiométricas por píxel são fornecidas em refletâncias TOA e contém também os parâmetros para as transformar em radiâncias.

Os produtos de nível 1C são reamostrados com uma distância de amostragem de solo (GSD) de 10, 20 e 60 metros, dependendo da resolução nativa das diferentes bandas espectrais. A Figura 6 representa as imagens de dia 4 de junho (pré-incêndio) e de 4 julho (pós-incêndio) de 2017 utilizadas neste trabalho.



**Figura 6:** Imagens Sentinel-2A de 4 de junho (pré-fogo) (a) e 4 de julho de 2017(pós-fogo) (b).

Numa primeira fase, foi efetuada uma reamostragem às imagens originais. Foi definido que cada píxel tinha um tamanho de 10 m, que resultou numa dimensão 10 980 píxéis em largura e altura. O método de interpolação adotado foi o *Nearest neighbour*. Após a execução das reamostragens dos produtos originais foi realizado um extrato da imagem que permitiu restringir à área de interesse, excluindo áreas desnecessárias. Com isto o produto fica com uma dimensão menor, tornando os processamentos seguintes menos morosos.

### 3.3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA PARA A CARTOGRAFIA DE ÁREAS ARDIDAS

Nesta secção será feito um enquadramento da metodologia utilizada. Para uma melhor compreensão dos procedimentos efetuados neste projeto, foi entendido subdividir-se a metodologia em cinco etapas:

1. Identificação visual dos limites da área ardida com base na imagem do satélite SPOT-7;
2. Produção das bandas de entrada para os algoritmos de classificação;
3. Aplicação de limiares com base em índices pré e pós-incêndios;
4. Classificação automática das imagens;
5. Validação das imagens classificadas

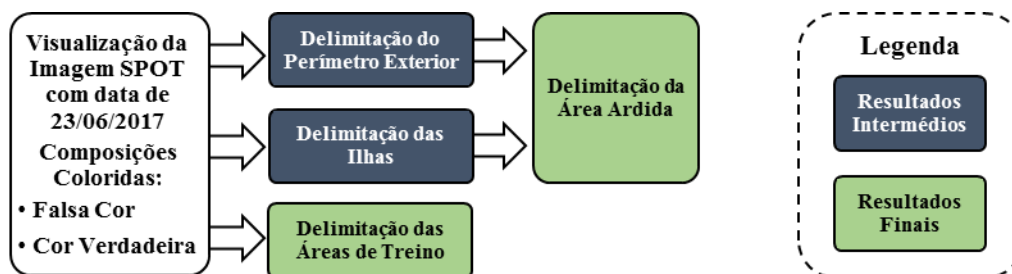
A primeira etapa tem como objetivo obter a área efetivamente ardida para posterior validação dos dados obtidos nas fases seguintes. A segunda etapa tem como propósito a produção de índices e bandas adicionais, para servir de dados entrada nas etapas 3 e 4.

Para a realização da delimitação dos perímetros de fogo e a respetiva área, que constitui o objetivo principal deste trabalho, foram utilizadas duas abordagens. Na primeira utilizou-se a aplicação de limiares com base nos índices pré e pós-incêndios de acordo com Bastarrika *et al.* (2011). Na segunda abordagem aplicou-se a classificação automática de imagens, recorrendo-se aos algoritmos máxima verosimilhança e rede neuronal.

#### 3.3.1. Identificação visual dos limites da área ardida com base na imagem do satélite SPOT-7

Com base na imagem do satélite SPOT-7 de 26 de junho de 2017 procedeu-se à delimitação do perímetro da área queimada (Figura 5). As áreas que não foram afetadas pelo incêndio e que se encontravam dentro do perímetro anteriormente desenhado também foram delimitadas, áreas essas que foram nomeadas como ilhas.

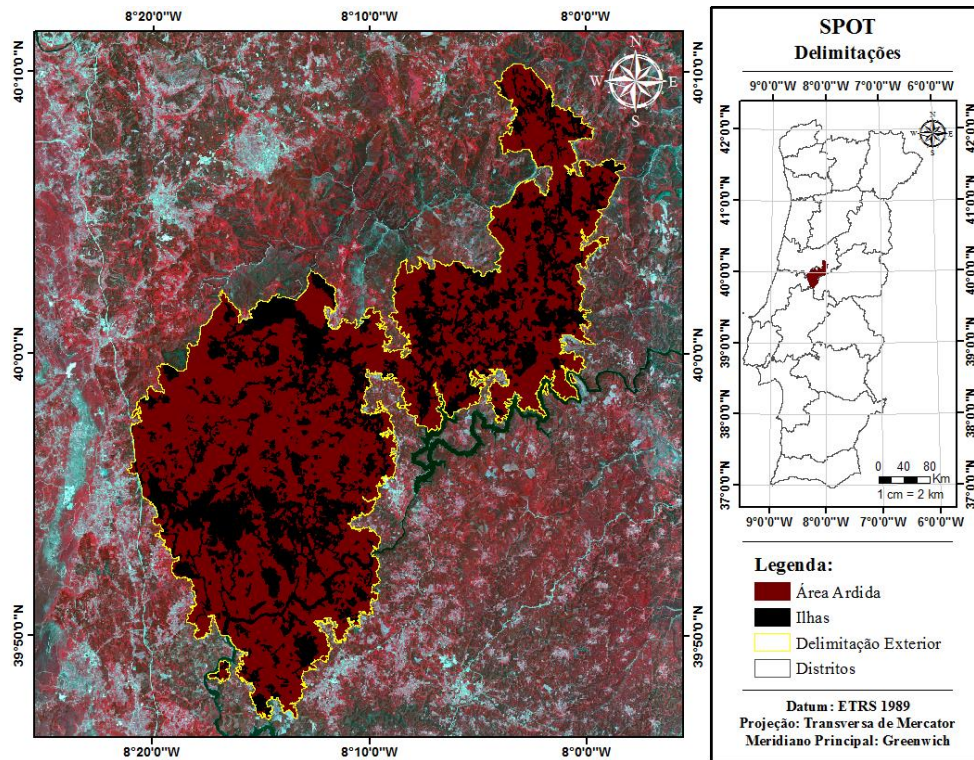
Esta delimitação foi feita manualmente sobre uma imagem com uma composição colorida de falsa cor, que permitiu distinguir melhor o que efetivamente ardeu ou não. De modo a obter um resultado fiável e uniforme ao longo do processo, decidiu-se que a delimitação seria efetuada a uma escala de 1:5 000. Nas áreas que suscitavam mais dúvidas, observou-se alternadamente a imagem falsa cor e a imagem cor verdadeira para uma melhor decisão quanto à delimitação. Na Figura 7 é apresentado um esquema com as fases seguidas para concretizar as delimitações referidas.



**Figura 7:** Representação esquemática do processo de delimitação da área ardida e das áreas de treino.

A delimitação exterior da área ardida foi feita através do traçado de uma linha ao longo de todo o perímetro desta mesma área. Posteriormente converteu-se num polígono para o cálculo da área abrangida. Obtida a delimitação do perímetro da área afetada pelo incêndio rural, foi executada de seguida a delimitação das

zonas de vegetação e zonas urbanas que permaneceram intactas após o incêndio (ilhas). A Figura 8 representa a delimitação do perímetro exterior da área ardida, a própria área ardida e ilhas.



**Figura 8:** Representação da área ardida e ilhas, delimitadas manualmente.

Ainda com base na imagem SPOT-7 foram definidas áreas de treino que servirão de classes de entrada para os algoritmos de classificação, utilizados para a identificação automática da área ardida. Neste estudo, definiram-se 30 polígonos em zonas afetadas pelo incêndio e mais 78 polígonos em áreas não afetadas pelo mesmo, como se pode verificar na Tabela 5 e observar a sua representação espacial na Figura 9. Estes polígonos contêm áreas ardidas com diferentes graus de severidade causados pelo fogo, incluindo zonas onde o incêndio foi mais severo e zonas onde foi passageiro e não tão intenso. As áreas não afetadas pelo incêndio correspondem tanto a zonas de vegetação como a zonas urbanas e a cursos de água. Optou-se por estabelecer mais polígonos para a classe “Não Ardido” dada à sua maior variabilidade espectral, ao contrário da classe “Ardido” que apresenta valores muito semelhantes, onde em áreas de elevada severidade a cor predominante é o preto e em zonas de menor severidade é o cinzento.

**Tabela 5:** Quantidade de áreas de treino e respetivas classes.

|                        | Classes de Entrada | Quantidade |
|------------------------|--------------------|------------|
| <b>Áreas de Treino</b> | Ardido             | 30         |
|                        | Não Ardido         | 78         |
| <b>Total</b>           | <b>2</b>           | <b>108</b> |



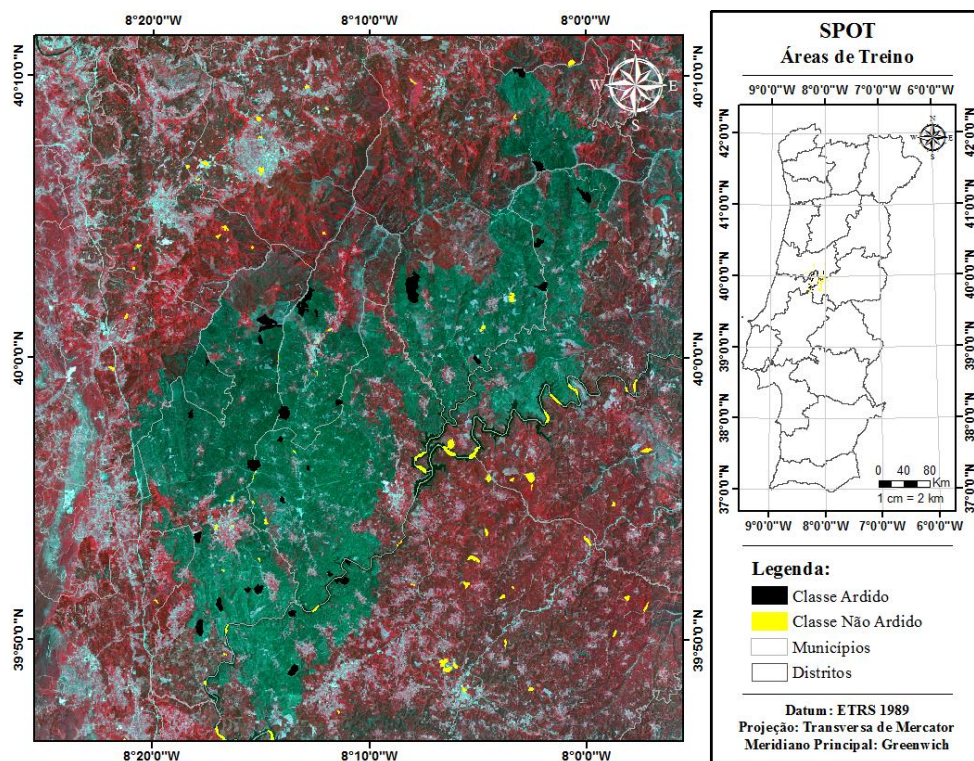


Figura 9: Representação das áreas de treino, delimitadas manualmente.

### 3.3.2. Produção das bandas para os algoritmos de classificação

Nesta etapa foi realizado o cálculo dos índices para cada uma das imagens pré e pós-incêndio dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, Tabela 2.

- Imagens Sentinel-1:
  - 13 de junho de 2017 (pré-incêndio);
  - 13 de julho de 2017 (pós-incêndio).
- Imagens Sentinel-2:
  - 4 de junho de 2017 (pré-incêndio);
  - 4 de julho de 2017 (pós-incêndio).

Utilizando as imagens referidas anteriormente, foi feita a conversão de número digital (DN) para refletâncias das bandas B4, B8, B11 e B12 de cada uma das imagens, dividindo o valor de cada píxel das mesmas por 10 000, valor fornecido pela ESA. Após esta operação procedeu-se ao cálculo dos seguintes índices:

**NDVI:** O índice *Normalized Difference Vegetation Index* foi desenvolvido por Rouse *et al.* em 1974 de modo a avaliar a condição da vegetação utilizando imagens do satélite ERTS-1 MSS. Este índice determina a atividade fotossintética da vegetação, indicando a densidade de verde existente. Quando a luz solar atinge os objetos, determinados comprimentos de onda são absorvidos e outros refletidos. Na vegetação os comprimentos de onda de maior absorção situam-se na faixa de 650nm, que corresponde à cor vermelha.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (4)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR e  $\rho_R$  é a refletância no vermelho.

**GEMI:** O índice *Global Environmental Monitoring Index* é semelhante ao índice NDVI, mas menos sensível aos efeitos atmosféricos. Pinty e Verstraete em 1992 propuseram este índice não linear para explicar os efeitos do solo e da atmosfera simultaneamente. O índice GEMI discrimina melhor áreas queimadas do que o NDVI.

$$GEMI = \frac{\eta(1 - 0.25\eta) - (\rho_R - 0.125)}{(1 - \rho_R)} = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_R}{(\rho_R + \rho_{NIR} + 0.5)} \quad (5)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR e  $\rho_R$  a refletância no vermelho.

**BAI:** O índice *Burned Area Index* destaca as áreas queimadas no espectro vermelho para o infravermelho próximo, evidenciando o sinal de carvão nas imagens pós-fogo. O índice é calculado a partir da distância espectral de cada píxel até um ponto espectral de referência, onde as áreas recentemente queimadas convergem. Os píxeis mais claros representam áreas queimadas [Martín, 1998].

$$BAI = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_R - \rho_{cR})^2} \quad (6)$$

Em que,  $\rho_{cNIR}$  e  $\rho_{cR}$  são valores de convergência, 0.06 e 0.1 respetivamente,  $\rho_{NIR}$  a refletância no NIR e  $\rho_R$  a refletância no vermelho.

**NBR<sub>S</sub>:** O índice *Normalized Burned Index* foi desenvolvido com o objetivo de destacar áreas queimadas e estimar a severidade do fogo. A fórmula matemática é semelhante ao índice NDVI, mas ao invés de usar o comprimento de onda vermelho, neste caso utiliza-se comprimentos de infravermelho de ondas curtas (SWIR) [Key & Benson, 1999].

$$NBR_S = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SSWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SSWIR}} \quad (7)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR,  $\rho_{SSWIR}$  a refletância no SWIR curto.

**BAIM<sub>S</sub>:** O índice *Burnt Area Index for MODIS* baseia-se no índice de área queimada (BAI), proposto por Martín *et al.* (2005) com o objetivo de mapear áreas queimadas usando as bandas do vermelho e infravermelho próximo do NOAA-AVHRR. Para dados Sentinel-2 a banda vermelha foi alterada pela banda 11 (SWIR). A banda SWIR é menos afetada por problemas atmosféricos e auxilia na resolução de problemas com corpos de água [Martin, 2005].

$$BAIM_S = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{SSWIR} - \rho_{cSSWIR})^2} \quad (8)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR,  $\rho_{SSWIR}$  a refletância no SWIR curto,  $\rho_{cNIR}$  e  $\rho_{cSSWIR}$  são valores de convergência, 0.05 e 0.2 respetivamente.

**NBR<sub>L</sub>:** Este índice é análogo ao índice NBR<sub>S</sub>, a fórmula matemática é igual à do índice NBR<sub>S</sub> mas ao invés de se utilizar a banda 11 (SWIR) é utilizada a banda 12 (SWIR) [Martin, 2005].

$$NBR_L = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{LSWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{LSWIR}} \quad (9)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR,  $\rho_{LSWIR}$  a refletância no SWIR longo.

**BAIM<sub>L</sub>**: Este índice é análogo ao índice BAIM<sub>S</sub>, mas ao invés da banda 11 (SWIR) é utilizada a banda 12 (SWIR). Em ambos os índices, os píxeis mais escuros representam áreas não queimadas e os píxeis mais claros, áreas queimadas [Martin, 2005].

$$BAIM_L = \frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{LSWIR} - \rho_{cLSWIR})^2} \quad (10)$$

Onde,  $\rho_{NIR}$  é a refletância no NIR,  $\rho_{LSWIR}$  a refletância no SWIR longo,  $\rho_{cNIR}$  e  $\rho_{cLSWIR}$  são valores de convergência, 0.05 e 0.2 respetivamente.

**MIRBI**: O índice *Mid Infrared Burned Index* foi desenvolvido para fornecer alta sensibilidade às mudanças espectrais causadas pelo incêndio. Neste índice os píxeis das áreas brancas correspondem à área ardida [Trigg & Flasse, 2001].

$$MIRBI = 10\rho_{LSWIR} - 9.8\rho_{SSWIR} + 2 \quad (11)$$

Onde,  $\rho_{LSWIR}$  a refletância no SWIR longo e  $\rho_{SSWIR}$  a refletância no SWIR curto.

### 3.3.2.1 Operações aritméticas de índices

Concluído o cálculo dos oito índices referidos no capítulo 3.3.1, para cada uma das quatro imagens realizaram-se as operações aritméticas razão e diferença. Estas operações matemáticas incidiram entre os índices calculados nas imagens antes dos incêndios e os índices após os mesmos. A título exemplificativo, foi calculada a razão entre o índice correspondente ao NDVI após incêndios (04/07/2017) e o NDVI antes dos incêndios (04/06/2017). Para os restantes índices é seguida a mesma metodologia. Na Figura 10 está esquematizado o modelo que representa o procedimento geral seguido. Para a execução das operações aritméticas das diferenças, o processo é análogo ao da razão. Os resultados obtidos encontram-se no Anexo B.

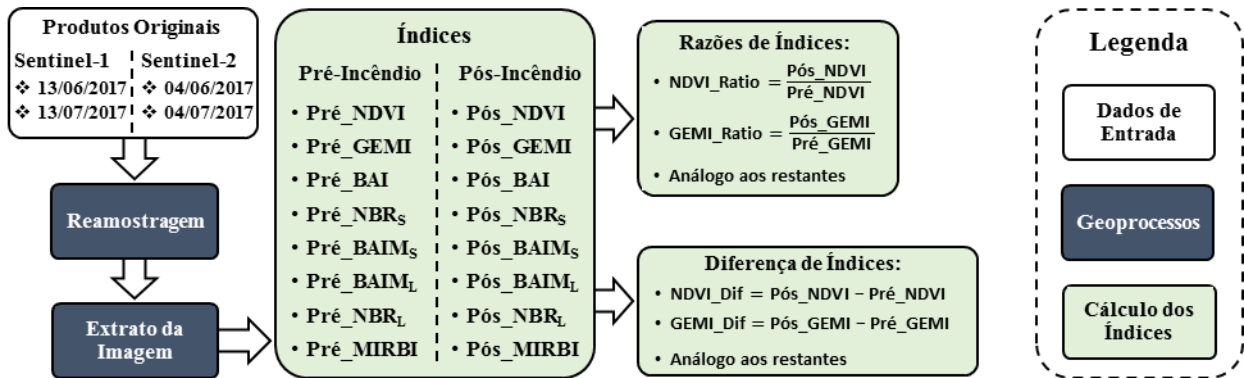


Figura 10: Representação esquemática do processo de obtenção das razões e diferenças de índices.

### 3.3.3. Aplicação de limiares com base nos índices pré e pós-incêndios

Obtidos os índices anteriormente referidos e as respetivas operações fundamentais, procedeu-se ao cálculo dos critérios de classificação de acordo com a metodologia proposta por Bastarrika *et al.* (2011). As condições a utilizar para os grupos espectrais são as representadas em (12), (13) e (14) e os intervalos de

comprimento de onda correspondentes a cada banda estão representadas abaixo. Estes critérios originaram 3 imagens binárias, onde o 0 correspondia a zonas não ardidas e o 1 a zonas ardidas.

1. Visível (VIS, 0.4-0.7  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho próximo (NIR, 0.7-1.2  $\mu\text{m}$ );
2. Visível, NIR e uma banda no infravermelho médio (SWIR1, 1.5-1.8  $\mu\text{m}$ );
3. Visível, NIR e uma banda no infravermelho longo (SWIR2, 2-2.2  $\mu\text{m}$ ).

A condição (12) representa o grupo do domínio espectral do visível e do infravermelho próximo (VIS+NIR), sendo que integra os índices NDVI, BAI e GEMI.

$$Diff_{BAI} > 144.3835 \text{ AND } Diff_{NDVI} < -0.17767 \text{ AND } Post_{NDVI} < 0.14413 \text{ AND } Diff_{GEMI} < -0.11578 \quad (12)$$

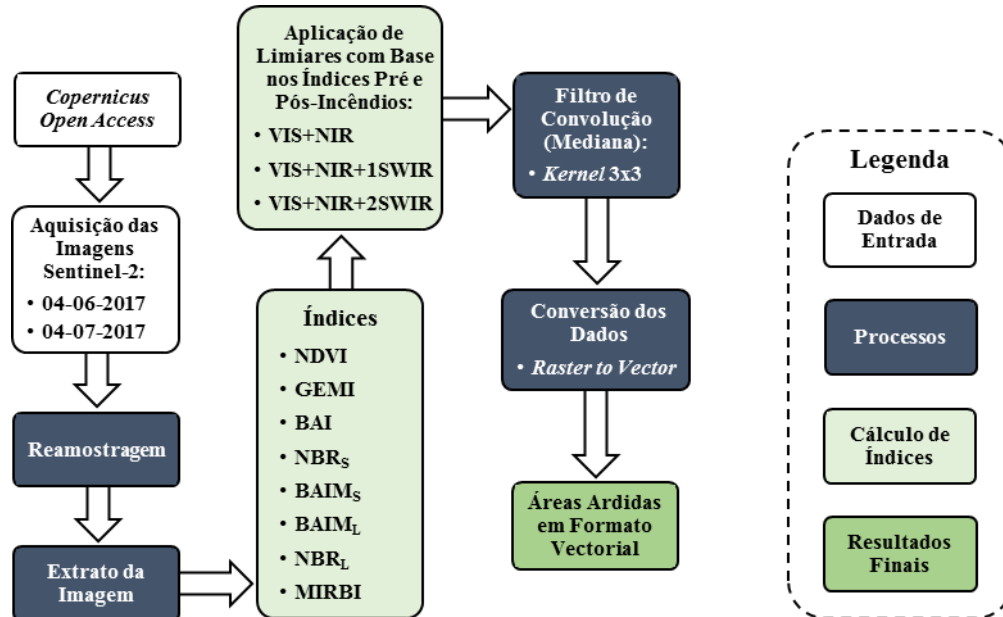
A condição (13) representa o grupo do domínio espectral do infravermelho próximo e do infravermelho médio, integrando os índices NBR<sub>S</sub> e BAIM<sub>S</sub>.

$$Diff_{BAIM_S} > 46.8143 \text{ AND } Diff_{NDVI} < -0.17767 \text{ AND } Post_{NBR_S} < -0.17079 \text{ AND } Post_{BAI} > 188.88 \quad (13)$$

A condição (14) representa o grupo espectral do domínio espectral do infravermelho próximo e do infravermelho longo, contemplando os índices NBR<sub>L</sub>, BAIM<sub>L</sub> e MIRBI.

$$Diff_{BAIM_L} > 56.2384 \text{ AND } Diff_{NDVI} < -0.17767 \text{ AND } Post_{MIRBI} > 1.8514 \text{ AND } Post_{NBR_L} < -0.15006 \quad (14)$$

De seguida, procedeu-se a uma filtragem espacial das 3 imagens geradas recorrendo a um filtro de convolução de mediana. Desta forma suavizou-se o ruído existente eliminando pequenos pontos espalhados pela imagem, mas preservando o contorno e os pequenos detalhes, tornando as imagens mais harmonizadas. Posteriormente, converteram-se as imagens de formato matricial para formato vetorial. A Figura 11 representa esquematicamente o procedimento seguido para determinar as 3 imagens em formato vetorial geradas a partir das condições acima mencionadas, 12, 13 e 14.



**Figura 11:** Representação esquemática do processo de obtenção das áreas ardidas dos limiares com base nos índices pré e pós-incêndios.

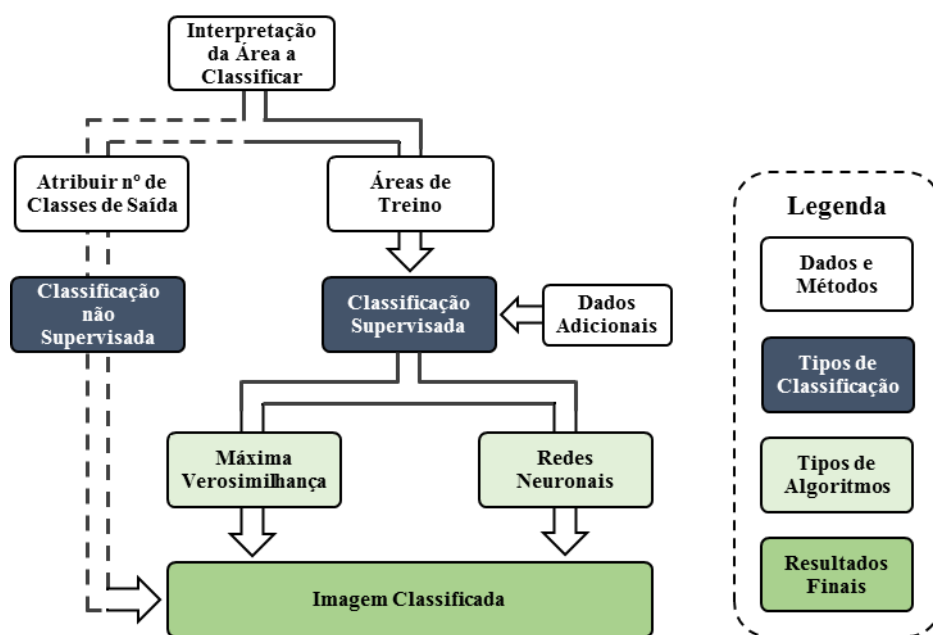


### 3.3.4. Classificação automática das imagens

Existem duas categorias de técnicas de classificação de imagem: a classificação não supervisionada, onde o algoritmo classifica a imagem automaticamente e os píxeis com características semelhantes são agrupados com base na análise do próprio, sem que o utilizador indique classes de entrada e seja somente possível a este indicar o número de classes de saída.; e a classificação supervisionada onde o utilizador introduz classes de entrada e certas restrições.

Na classificação supervisionada são seleccionados píxeis de amostra numa imagem com base no conhecimento do utilizador que irão ser representativos de classes específicas. Com esta recolha de amostras direcciona-se o algoritmo para utilizar essas áreas, conhecidas como áreas de treino ou classes de entrada, como referência para a classificação de todos os outros píxeis contidos na imagem. É também definido pelo utilizador o número de classes nas quais a imagem vai ser classificada e os limites de como os outros píxeis se devem assemelhar de modo a serem agrupados [Extension, 2018].

Os algoritmos de classificação supervisionada utilizados neste estudo foram dois algoritmos distintos: um consiste na máxima verossimilhança e o outro em redes neuronais como se pode observar na Figura 12. Para estes dois algoritmos funcionarem corretamente é necessário definir primeiramente as áreas de treino que ditam o tipo de classes a obter no resultado da classificação. Estes polígonos foram previamente concebidos e explanados na secção 3.3.1.



**Figura 12:** Representação esquemática dos tipos de classificação de imagens

Com base nos índices gerados anteriormente na secção 3.3.2, criaram-se conjuntos de bandas para serem utilizados na classificação supervisionada das imagens. De forma a sintetizar os índices usados e para uma

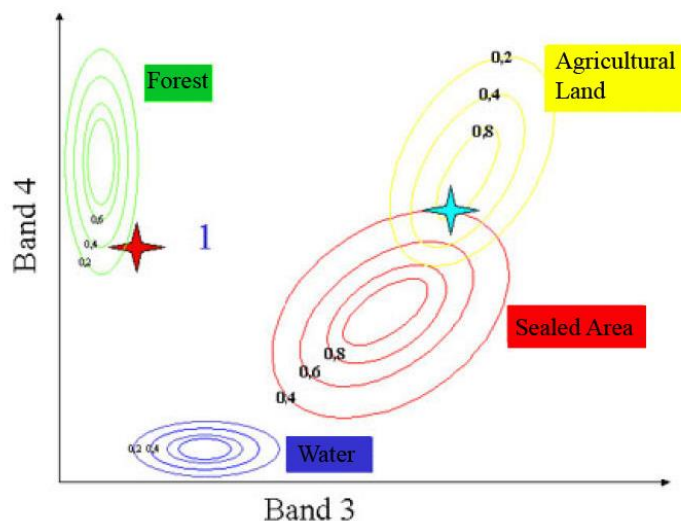
melhor compreensão ao longo do texto, criou-se uma nomenclatura para os conjuntos de bandas que se encontram identificados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Nomenclatura dos conjuntos de índices

| Conjunto de Índices |                   |                   |                  |                   |                   |                  |
|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| NGB                 | NB                | NBM               | ALL              |                   | 3B                | 5S               |
| NDVI                | NBR <sub>S</sub>  | NBR <sub>L</sub>  | NDVI             | BAIM <sub>S</sub> | BAI               | NDVI             |
| GEMI                | BAIM <sub>S</sub> | BAIM <sub>L</sub> | GEMI             | NBR <sub>L</sub>  | BAIM <sub>S</sub> | GEMI             |
| BAI                 |                   | MIRBI             | BAI              | BAIM <sub>L</sub> | BAIM <sub>L</sub> | NBR <sub>S</sub> |
|                     |                   |                   | NBR <sub>S</sub> | MIRBI             |                   | NBR <sub>L</sub> |
|                     |                   |                   |                  |                   |                   | MIRBI            |

### 3.3.4.1 Máxima Verosimilhança

A máxima verosimilhança é o algoritmo mais comum em classificação de imagens de satélite. Este utiliza uma função de densidade de probabilidade em que o classificador atribui a uma certa classe um píxel específico. O algoritmo assume que as estatísticas de cada classe em cada banda são normalmente distribuídas e calcula a probabilidade de um determinado píxel pertencer a uma classe específica [Harris Geospatial Solutions, 2018]. Cada píxel é atribuído à classe que tem a maior probabilidade, ou seja, a máxima verosimilhança como se pode observar na Figura 13. Um píxel afastado do ponto central de uma dada classe poderá ser classificado desde que não esteja numa área de outra classe. Este será atribuído à classe que tiver maior proximidade com o seu ponto central [SEOS, 2018].



**Figura 13:** Princípio de classificação máxima verosimilhança (Fonte: Naumann 2008).

A implementação da classificação máxima verosimilhança efetua-se a partir do cálculo da função discriminante para cada píxel na imagem, representada na Equação 15.

$$g_i(x) = \ln p(w_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)^T \Sigma_i^{-1} (x - m_i) \quad (15)$$

Onde:

$i$  = classe;

$x$  =  $n$ -dimensional (onde  $n$  representa o número de bandas);

$p(w_i)$  = Probabilidade da classe  $W_i$  ocorrer na imagem e seja assumida para todas as classes;

$|\Sigma_i|$  = determinante da covariância da matriz dos dados da classe  $W_i$ ;

$\Sigma_i^{-1}$  = matriz inversa do determinante da covariância;

$m_i$  = Vetor médio.

Para a implementação deste algoritmo de classificação é necessário definir em primeiro lugar as áreas de treino ou classes de entrada como referido na secção 3.3.1. No caso deste trabalho estas foram delimitadas com recurso a uma imagem do satélite SPOT-7, da zona a classificar.

Ao utilizar o algoritmo da máxima verossimilhança é necessário definir o limite de probabilidade, sendo possível estabelecer um valor único para todas as classes ou um limite diferente para cada uma. Este limite permite definir a probabilidade de inclusão dos píxeis nas diversas classes

Para uma melhor compreensão e de forma a sintetizar a designação de cada teste realizado, a Tabela 7 ilustra a nomenclatura usada para diferenciar os testes efetuados com este algoritmo. A Tabela 7 distingue os testes efetuados com conjuntos de índices provenientes de imagens do satélite Sentinel-1 e Sentinel-2 distintivamente e conjuntos de índices de ambos os satélites.

**Tabela 7:** Nomenclatura dos testes de máxima verossimilhança efetuados.

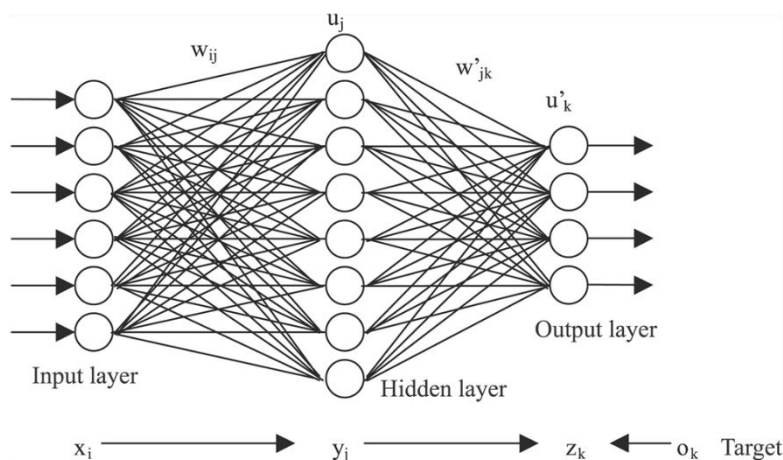
| Sentinel-2 (Nível-1C) |       |           | Sentinel-1          |       |           | Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |       |           |
|-----------------------|-------|-----------|---------------------|-------|-----------|------------------------------------|-------|-----------|
| Conjunto de Índices   | Razão | Diferença | Conjunto de Índices | Razão | Diferença | Conjunto de Índices                | Razão | Diferença |
| <b>NGB</b>            | M1.0  | m1.0      | <b>VH+VV</b>        | L1.0  | l1.0      | <b>NGB - VH+VV</b>                 | E1.0  | e1.0      |
| <b>NB</b>             | M2.0  | m2.0      | -----               | ----- | -----     | <b>NB - VH+VV</b>                  | E2.0  | e2.0      |
| <b>NBM</b>            | M3.0  | m3.0      | -----               | ----- | -----     | <b>NBM - VH+VV</b>                 | E3.0  | e3.0      |
| <b>ALL</b>            | M4.0  | m4.0      | -----               | ----- | -----     | <b>ALL - VH+VV</b>                 | E4.0  | e4.0      |
| <b>3B</b>             | M5.0  | m5.0      | -----               | ----- | -----     | <b>3B - VH+VV</b>                  | E5.0  | e5.0      |
| <b>5S</b>             | M6.0  | m6.0      | -----               | ----- | -----     | <b>5S - VH+VV</b>                  | E6.0  | e6.0      |

Foram concretizados 26 testes utilizando o algoritmo de máxima verossimilhança, dos quais 13 são com base na razão dos índices de julho e junho e os outros 13 com base na diferença de índices para os mesmos meses. Estas operações foram detalhadamente enunciadas na secção 3.3.2.1.

### 3.3.4.2 Rede Neuronal

As redes neurais contêm um fator muito importante que consiste em assegurar a sua capacidade de generalização, sendo desta forma possível garantir que o desempenho da rede é assegurado para dados desconhecidos. O procedimento utilizado para implementar o processo de aprendizagem é denominado algoritmo de aprendizagem, que tem como função modelar os pesos sinápticos da rede ponderadamente de forma a chegar ao objetivo pretendido [Santos, 2015].

Os dados ao entrarem do algoritmo, passam pelo primeiro neurónio que está programado para reagir a certos atributos específicos, após a execução desta operação os dados prosseguem a cadeia e entram noutro neurónio que está programado para reagir de outra determinada maneira e assim sucessivamente até se chegar a um ficheiro de saída, como se pode ver na Figura 14.



**Figura 14:** Representação de uma rede neuronal (Fonte: Naumann. 2008).

Quanto à aplicação de diferentes classificadores, uma das questões levantadas em relação às redes neurais tem que ver com a possibilidade de ocorrência de *over-training*. Uma rede que contenha muitos neurónios ou camadas é considerada uma rede complexa. Estas redes estão sujeitas a sofrer *over-training*, ou seja, o treino é demasiadamente excessivo e provoca um ajuste hiperbólico dos dados resultando numa redução da exatidão da classificação. De maneira oposta, uma rede com poucos neurónios ou camadas constitui uma rede simples. Devido à sua simplicidade, estas redes podem não estar capacitadas a modelar problemas mais complexos. Contudo, a classificação por redes neurais é um método bastante eficiente no tratamento de grandes quantidades de dados, não havendo necessidade de uma distribuição específica dos mesmos. Outra vantagem deste método consiste na manipulação de dados de diferentes fontes, com diferentes níveis de exatidão e ruído. Geralmente, a utilização deste algoritmo origina melhores resultados que o algoritmo da máxima verosimilhança em cerca de 9% de exatidão global [Mustapha *et al.*, 2010].

A aprendizagem deste algoritmo desenrola-se com o ajustar dos pesos no nó de saída e nos dados de saída, sendo que para a realização dos testes com este algoritmo é necessário compreender os seguintes parâmetros:

- **Activation function:** O software permite optar por dois modos de ativação, logístico ou hiperbólico, tendo sido escolhido o modo logístico. Esta escolha reside na necessidade da função de ativação ser contínua e não linear, de forma a que a sua derivada exista.

- **Training Threshold Contribution (TTC):** Determina a dimensão da contribuição do peso interno em relação ao nível de ativação do nó. Os valores que podem ser inseridos situam-se entre 0 e 1, sendo que a introdução do valor zero neste parâmetro não ajusta os pesos internos do nó. Com os ajustes dos pesos internos dos nós é possível chegar a uma melhor classificação, mas em contrapartida, o uso excessivo de pesos pode resultar numa má generalização;
- **Training Rates (TR):** A taxa de treino estabelece a dimensão do ajuste dos pesos. Uma taxa elevada acelera o treino, mas aumenta o risco de ocorrerem oscilações ou não convergência do resultado do treino. Neste campo podem ser inseridos valores entre 0 e 1;
- **Training Momentum (TM):** Este campo permite incentivar alterações de peso ao longo do rumo atual, permitindo valores entre 0 e 1, onde a introdução de uma taxa maior que zero permite uma taxa de treino mais elevada sem oscilações;
- **Training Root Mean Square (RMS) Exit Criteria (RMSEC):** Neste campo é inserido o valor de erro no qual o treino é interrompido. Se o valor do RMS durante o treino for menor que o valor inserido neste campo, o treino é interrompido e mesmo que o número de iterações não tenha sido concluído, a classificação é executada e finalizada;
- **Number of Hidden Layers (NHL):** Numa classificação linear deve-se introduzir o valor de 0, para uma classificação não linear introduz-se um valor de 1 ou superior. Em situações em que as regiões de entrada são linearmente inseparáveis e requerem dois hiper planos, para separar as classes deve ter-se pelo menos uma camada oculta;
- **Number of Training Iterations (NTI):** Este campo permite iterar o algoritmo as vezes que forem necessárias até à obtenção do melhor resultado.

Para realizar os testes com este algoritmo, primeiramente foram estipulados valores para os parâmetros anteriormente referidos. A Tabela 8 ilustra os valores dos parâmetros utilizados nos seis testes realizados.

**Tabela 8:** Valores dos parâmetros nos testes efetuados recorrendo a uma rede neuronal.

| Parâmetros    | Testes |      |      |      |      |       |
|---------------|--------|------|------|------|------|-------|
|               | 1      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     |
| <b>TTC</b>    | 0.90   | 0.90 | 0.90 | 0.50 | 0.90 | 0.90  |
| <b>TR</b>     | 0.20   | 0.90 | 0.90 | 0.10 | 0.20 | 1.00  |
| <b>TM</b>     | 0.90   | 0.10 | 0.10 | 0.90 | 0.90 | 0.90  |
| <b>RMESEC</b> | 0.10   | 0.08 | 0.05 | 0.90 | 0.10 | 0.001 |
| <b>NHL</b>    | 1      | 1    | 1    | 1    | 2    | 1     |
| <b>NTI</b>    | 1000   | 1000 | 1000 | 100  | 1000 | 500   |

Seguindo um procedimento análogo ao dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança, referidos no capítulo 3.3.4.1, a Tabela 9 ilustra a nomenclatura definida para os testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal. As Tabelas 9, 10 e 11 de forma semelhante à Tabela 7 distinguem os testes efetuados com conjuntos de índices provenientes de imagens do satélite Sentinel-1 e Sentinel-2 distintivamente e conjuntos de índices de ambos os satélites.

**Tabela 9:** Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-2.

| Designação dos Testes Sentinel-2 (Nível-1C) |       |      |      |      |      |      |           |      |      |      |      |      |
|---|-------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| Conjunto de Índices                         | Razão |      |      |      |      |      | Diferença |      |      |      |      |      |
|   | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| <b>NGB</b>                                  | R1.1  | R1.2 | R1.3 | R1.4 | R1.5 | R1.6 | r1.1      | r1.2 | r1.3 | r1.4 | r1.5 | r1.6 |
| <b>NB</b>                                   | R2.1  | R2.2 | R2.3 | R2.4 | R2.5 | R2.6 | r2.1      | r2.2 | r2.3 | r2.4 | r2.5 | r2.6 |
| <b>NBM</b>                                  | R3.1  | R3.2 | R3.3 | R3.4 | R3.5 | R3.6 | r3.1      | r3.2 | r3.3 | r3.4 | r3.5 | r3.6 |
| <b>ALL</b>                                  | R4.1  | R4.2 | R4.3 | R4.4 | R4.5 | R4.6 | r4.1      | r4.2 | r4.3 | r4.4 | r4.5 | r4.6 |
| <b>3B</b>                                   | R5.1  | R5.2 | R5.3 | R5.4 | R5.5 | R5.6 | r5.1      | r5.2 | r5.3 | r5.4 | r5.5 | r5.6 |
| <b>5S</b>                                   | R6.1  | R6.2 | R6.3 | R6.4 | R6.5 | R6.6 | r6.1      | r6.2 | r6.3 | r6.4 | r6.5 | r6.6 |

**Tabela 10:** Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-1.

| Designação dos Testes Sentinel-1 |       |      |      |      |      |      |           |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|-------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| Conjunto de Índices              | Razão |      |      |      |      |      | Diferença |      |      |      |      |      |
|                                  | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| <b>VH+VV</b>                     | A1.1  | A1.2 | A1.3 | A1.4 | A1.5 | A1.6 | a1.1      | a1.2 | a1.3 | a1.4 | a1.5 | a1.6 |

**Tabela 11:** Nomenclatura dos testes de rede neuronal com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Designação dos Testes Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |       |      |      |      |      |      |           |      |      |      |      |      |
|--|-------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|
| Conjunto de Índices                                      | Razão |      |      |      |      |      | Diferença |      |      |      |      |      |
|  | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 1         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| <b>NGB - VH+VV</b>                                       | N1.1  | N1.2 | N1.3 | N1.4 | N1.5 | N1.6 | n1.1      | n1.2 | n1.3 | n1.4 | n1.5 | n1.6 |
| <b>NB - VH+VV</b>  | N2.1  | N2.2 | N2.3 | N2.4 | N2.5 | N2.6 | n2.1      | n2.2 | n2.3 | n2.4 | n2.5 | n2.6 |
| <b>NBM - VH+VV</b>                                       | N3.1  | N3.2 | N3.3 | N3.4 | N3.5 | N3.6 | n3.1      | n3.2 | n3.3 | n3.4 | n3.5 | n3.6 |
| <b>ALL - VH+VV</b>                                       | N4.1  | N4.2 | N4.3 | N4.4 | N4.5 | N4.6 | n4.1      | n4.2 | n4.3 | n4.4 | n4.5 | n4.6 |
| <b>3B - VH+VV</b>  | N5.1  | N5.2 | N5.3 | N5.4 | N5.5 | N5.6 | n5.1      | n5.2 | n5.3 | n5.4 | n5.5 | n5.6 |
| <b>5S - VH+VV</b>  | N6.1  | N6.2 | N6.3 | N6.4 | N6.5 | N6.6 | n6.1      | n6.2 | n6.3 | n6.4 | n6.5 | n6.6 |

Em suma, foram realizados 156 testes utilizando o algoritmo de rede neuronal, dos quais 72 com base em conjuntos de índices provenientes de imagens do satélite Sentinel-2, 12 com base em conjuntos de índices provenientes de imagens do satélite Sentinel-1, e os restantes 72 com base em conjuntos de índices provenientes de ambos os satélites, tal como nos testes da máxima verossimilhança.

### 3.3.4.3 Filtro de Convolução

Efetuada os 182 testes com os algoritmos máxima verossimilhança e rede neuronal, foi aplicado um filtro de convolução a todos os resultados obtidos dos testes referidos nos capítulos 3.3.4.1 e 3.3.4.2. A filtragem espacial das imagens efetuou-se com um filtro de mediana, que tem como objetivo suavizar a imagem preservando o contorno. Para a aplicação deste filtro estipulou-se uma janela (*kernel*) de 3x3. Na Figura 15

encontra-se a representação esquemática do processo para a filtragem das imagens resultantes da classificação supervisionada.

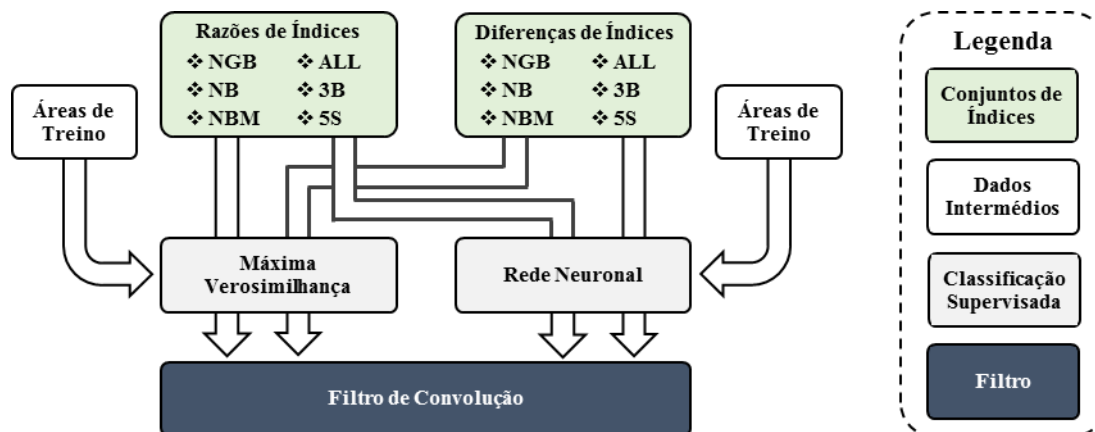


Figura 15: Representação esquemática do processo de obtenção das imagens classificadas filtradas.

### 3.3.5. Validação das imagens classificadas

#### 3.3.5.1 Validação através da delimitação efetuada com base na imagem SPOT-7

Nesta fase pretendeu-se identificar através de matrizes de confusão qual dos testes conseguiu classificar e identificar melhor a verdade do terreno. Todas as classificações resultantes dos testes mencionados nas secções anteriores foram validadas através da área delimitada manualmente na imagem proveniente do satélite SPOT-7, referida no capítulo 3.3.1, onde esta delimitação foi considerada como a verdade do terreno descrita pela imagem.

A matriz de confusão é uma tabela de dupla entrada que contém quatro resultados produzidos por um classificador binário [Classeval, 2018]. Este permite prever todos os dados de um conjunto como positivos ou negativos. Esta classificação (ou previsão) origina quatro resultados, como mencionado anteriormente. Os resultados são: verdadeiro positivo (*true positive*, TP), verdadeiro negativo (*true negative*, TN), falso positivo (*false positive*, FP) e falso negativo (*false negative*, FN), como se pode observar na Figura 16.

Interpretação:

- TP: Foi previsto que ardeu (positivo) e confirmou-se (é verdade);
- TN: Foi previsto que não ardeu (negativo) e confirmou-se (é verdade);
- FP: Foi previsto que ardeu (positivo) e não se confirmou (não é verdade);
- FN: Foi previsto que não ardeu (negativo) e não se confirmou (não é verdade).

|                   |          | Valores Vigentes   |                    | Total    |
|-------------------|----------|--------------------|--------------------|----------|
|                   |          | Positivo           | Negativo           |          |
| Valores Previstos | Positivo | TP<br>( $P_{11}$ ) | FP<br>( $P_{12}$ ) | $P_{1.}$ |
|                   | Negativo | FN<br>( $P_{21}$ ) | TN<br>( $P_{22}$ ) | $P_{2.}$ |
|                   | Total    | $P_{.1}$           | $P_{.2}$           | 1        |

**Figura 16:** Representação de Matriz Confusão.

Várias medidas como a exatidão global, coeficiente k, área arida efetiva, erros de comissão e erros de omissão, são derivadas da matriz de confusão.

No âmbito deste projeto, a exatidão global dos resultados é um dos parâmetros com maior relevância definida de acordo com a Equação (16).

$$Exatidão = \frac{TP + TN}{TP + TN + FN + FP} = \frac{TP + TN}{P + N} \quad (16)$$

Onde:

$TP+TN$  representa a soma do verdadeiro positivo com o verdadeiro negativo;

$P+N$  representa o número total de dados do conjunto.

O coeficiente kappa, calculado através da Equação (17), é um índice estatístico que permite medir a concordância entre itens qualitativos, sendo uma medida mais robusta que um cálculo de concordância percentual [pmean, 2018].

$$Coeficiente K = \frac{(TP + TN) - P_e}{1 - (P_{.1}P_{1.} + P_{.2}P_{2.})} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (17)$$

Onde:

$P_o$  representa o nível de concordância observado;

$P_e$  representa o valor esperado se os dois parâmetros (TP e TN) fossem independentes.

Dado que se trata de um índice, os valores de k variam entre 0 e 1, sendo que 1 implica uma concordância total entre valores e 0 implica uma discordância total.

Os valores do coeficiente k podem ser interpretados do seguinte modo [Landis e Koch, 1977]:

- Se  $k < 0.20$  existe muito baixa concordância;



- Se  $0.21 < k < 0.40$  existe uma baixa concordância;
- Se  $0.41 < k < 0.60$  existe uma concordância moderada;
- Se  $0.61 < k < 0.80$  existe uma boa concordância;
- Se  $0.81 < k < 1.00$  existe uma muito boa concordância.

O valor da área ardida efetiva corresponde à área ardida identificada positivamente tanto nos valores previstos como nos valores vigentes, correspondendo à posição  $P_{11}$  na matriz (TP, *True Positive*).

Os erros de comissão (EC) correspondem a píxeis erradamente identificados como área ardida, conduzindo a um acréscimo no número de píxeis classificados. Usualmente estes píxeis são confundidos com água, asfalto, sombras topográficas, nuvens, solo exposto, áreas urbanas e vegetação.

Neste projeto, foram considerados os erros de comissão para áreas ardidas ( $EC_A$ ) e não ardidas. Deste modo, o cálculo dos erros de comissão para áreas ardidas, Equação (18), representa o quociente entre o número de píxeis ardidos calculado em cada teste ( $P_{12}$ ) e o número total de píxeis não ardidos calculado pelo ICNF e pela delimitação efetuada com base na imagem SPOT-7 ( $P_{1.}$ ). O cálculo dos erros de comissão das áreas não ardidas ( $EC_{NA}$ ), Equação (19), efetua-se através do quociente entre o número de píxeis não ardidos em cada teste e o número de píxeis ardidos do ICNF.

$$EC_A = \frac{P_{12}}{P_{1.}} \quad (18)$$

$$EC_{NA} = \frac{P_{21}}{P_{2.}} \quad (19)$$

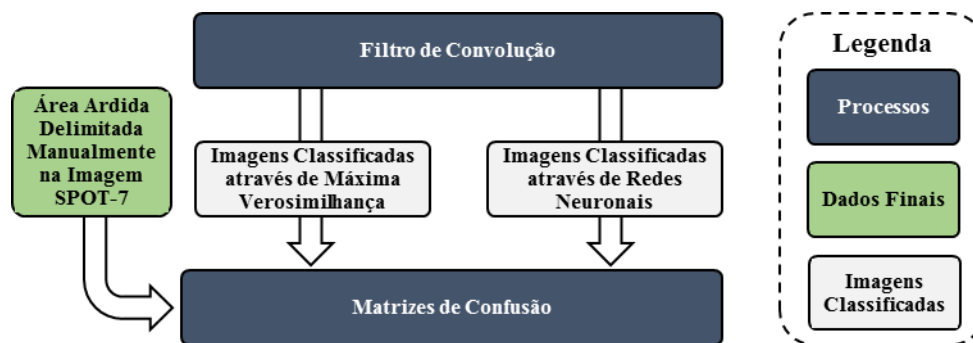
Os erros de omissão (EO) correspondem a píxeis ardidos que não foram identificados, existindo uma omissão de valores na classe. Estes erros podem ser originados pela sombra das copas das árvores que atenuam o sinal radiométrico numa situação pós-incêndio.

Analogamente ao cálculo dos erros de comissão, foram também considerados erros de omissão para a área ardida ( $EO_A$ ) e para a área não ardida ( $EO_{NA}$ ). Os erros de omissão para a área ardida correspondem ao quociente entre a área não ardida calculada por cada teste e área ardida total apresentada pelo ICNF e SPOT-7, sendo calculados através da Equação (20). Relativamente à área não ardida, o cálculo dos erros de omissão é efetuado através do quociente entre a área ardida calculada em cada teste e a área não ardida identificada pelo ICNF e SPOT-7 representado pela Equação (21).

$$EO_A = \frac{P_{21}}{P_{1.}} \quad (20)$$

$$EO_{NA} = \frac{P_{12}}{P_{2.}} \quad (21)$$

No processo de criação das matrizes de confusão, é necessário combinar as classes da verdade do solo da região de interesse, com as classes da imagem classificada com os algoritmos máxima verossimilhança e rede neuronal. As duas classes existentes são a classe “Ardido” e a classe “Não Ardido”. Na Figura 17 encontra-se a esquematização do processo de criação das matrizes de confusão dos 156 testes realizados com ambos os algoritmos de classificação supervisionada.



**Figura 17:** Representação esquemática do processo de obtenção das matrizes de confusão.

### 3.3.5.2 Validação com os dados do ICNF

A validação foi realizada posteriormente à obtenção das imagens através dos algoritmos de classificação supervisionada mencionados na secção anterior. A área das mesmas imagens foi convertida para ficheiro vetorial permitindo a comparação com o ficheiro vetorial do ICNF apresentado no capítulo 3.2.3.

Posteriormente, foi seguido um procedimento, esquematizado na Figura 18, visando calcular as matrizes de confusão como demonstrado na secção 3.3.5.1. Este principiou com a reprojeção dos dados de entrada para o sistema de coordenadas ETRS 1989 Portugal TM06. Realizada a reprojeção dos cinco ficheiros identificados (VIS+NIR, 1SWIR, 2SWIR, Teste e3.0 e Teste n3.5), seleccionaram-se apenas as áreas superiores a 0,5 ha. Para os dados do ICNF, restringiu-se o espaço temporal até à data de 23 de junho de 2017, excluindo assim as restantes áreas ardidas posteriormente.

Realizando as operações anteriores, procedeu-se à interseção de cada um dos ficheiros (tanto com base nos índices como na classificação automática) com a área ardida calculada pelo ICNF, obtendo-se a área ardida coincidente com ambos.

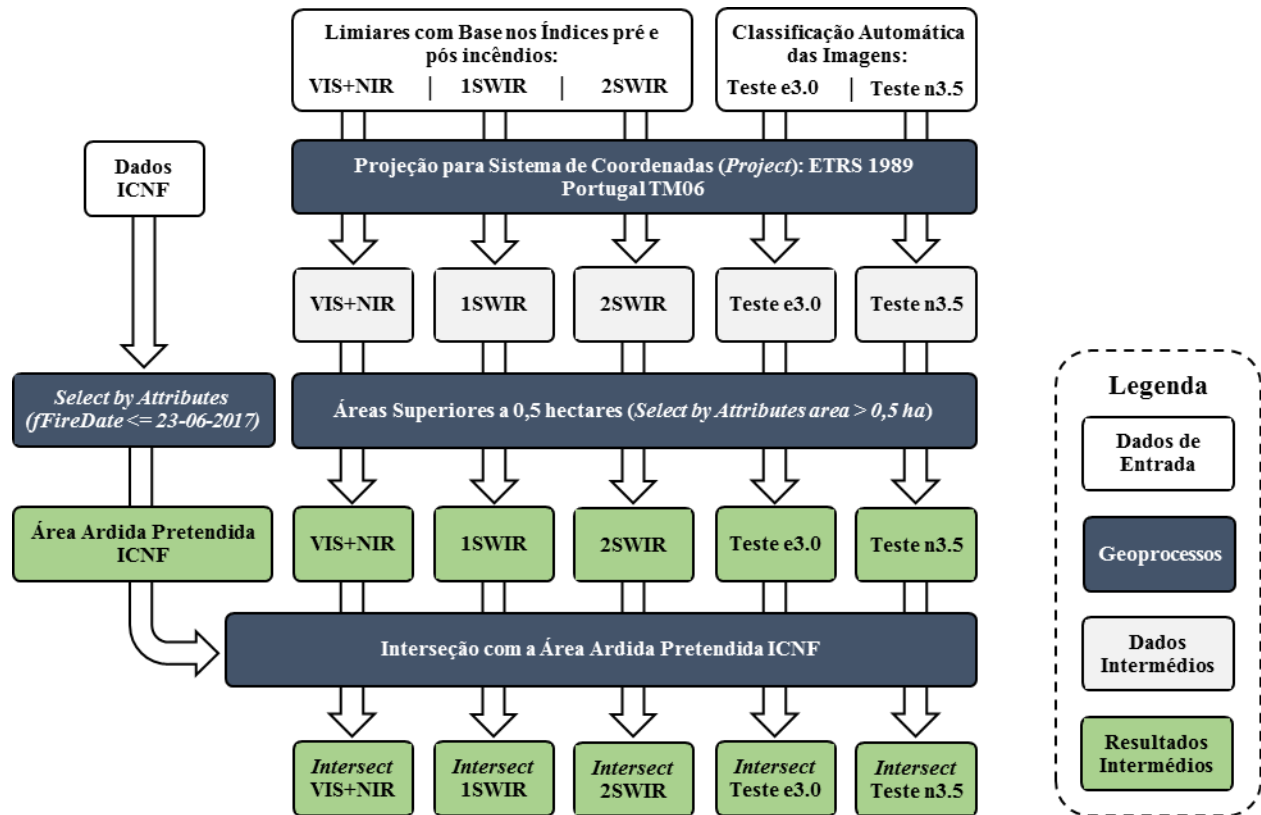


Figura 18: Representação esquemática do processo de obtenção das áreas ardidas.

## Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia referida no capítulo anterior. Foi entendido subdividir-se a exposição dos resultados em cinco subsecções. A primeira subsecção, 4.1, apresenta a área obtida da delimitação descrita na subsecção 3.3.1. De forma a validar os resultados obtidos dos vários testes realizados, utilizou-se a área árida delimitada manualmente com base na imagem do satélite SPOT-7 e a área calculada pelo ICNF, apresentando os resultados nas secções 4.2 e 4.3, respetivamente. Na subsecção 4.4 é feita a análise entre a área calculada pelo ICNF e a área delimitada manualmente. Na quinta e última subsecção, 4.5, é averiguada a diferença entre as áreas áridas calculadas pelo ICNF e delimitadas na imagem SPOT-7 e pelos algoritmos de classificação automática.

### 4.1. ÁREA ÁRIDA COM BASE NA IMAGEM DO SATÉLITE SPOT-7

De modo a obter o valor real da área árida, transformou-se o traçado da delimitação exterior num polígono. Desta forma, obteve-se uma área de 49.492,05 ha, incluindo as áreas áridas, bem como as áreas não afetadas, denominadas “ilhas”. Através do mesmo procedimento utilizado anteriormente, obteve-se uma área de 11.115,24 ha relativamente às “ilhas”. Dado que o objetivo é determinar o valor da área afetada pelos incêndios, a partir das áreas anteriormente calculadas, é possível obter a área pretendida, cujo valor foi de 38.376,81 ha (Figura 19).

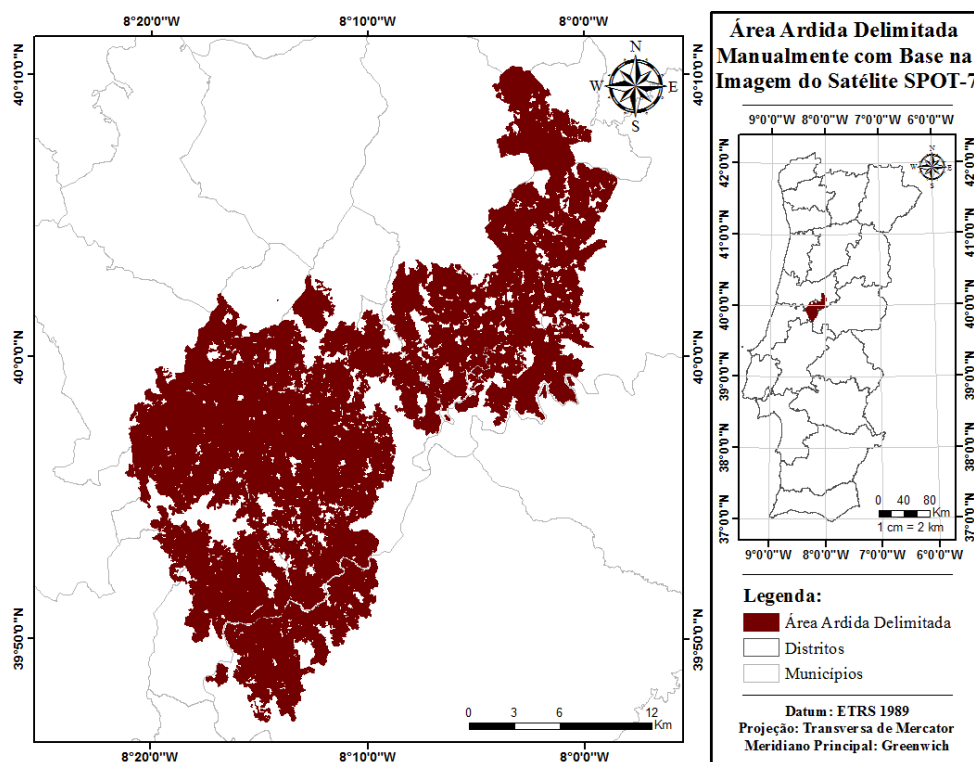


Figura 19: Área árida delimitada manualmente com base na imagem do satélite SPOT-7.

## 4.2. VALIDAÇÃO COM A DELIMITAÇÃO EXECUTADA NA IMAGEM SPOT-7

Esta secção apresenta a análise das matrizes de confusão com melhor exatidão resultantes da comparação da classificação automática (testes da máxima verosimilhança e rede neuronal) realizada com base nos distintos conjuntos espectrais com as respetivas áreas delimitadas na imagem SPOT-7. Para a área de estudo em causa neste projeto, a delimitação identificou uma área árida de 38 376,81 ha.

### 4.2.1. Limiares com base nos índices pré e pós-incêndios

As Tabelas 12, 13 e 14 apresentam, respetivamente a comparação entre a delimitação da imagem SPOT-7 e os domínios espectrais VIS+NIR, VIS+NIR+1SWIR, VIS+NIR+2SWIR.

Utilizando os valores resultantes da aplicação de limiares ao grupo espectral VIS+NIR e comparando com os obtidos pela delimitação com base na imagem SPOT (Tabela 12), é possível verificar uma discrepância dos valores correspondentes às áreas áridas e não áridas. No que concerne às áreas áridas, os valores calculados com base no domínio VIS+NIR são inferiores em cerca de 24,08% aos valores obtidos com base na imagem SPOT-7, enquanto que para a área não árida, os valores são superiores em cerca de 6,81%.

**Tabela 12:** Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR (áreas em ha).

| Delimitação SPOT-7 / VIS+NIR |                  |                   |                   |
|------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Matriz Confusão              | Ardido [SPOT]    | Não Ardido [SPOT] | Total             |
| Ardido [Sentinel-2A]         | 28 801,53        | 334,80            | 29 136,33         |
| Não Ardido [Sentinel-2A]     | 9 575,28         | 135 389,82        | 144 965,10        |
| <b>Total</b>                 | <b>38 376,81</b> | <b>135 724,62</b> | <b>174 101,43</b> |

Relativamente à comparação com o grupo espectral VIS+NIR+1SWIR (Tabela 13), a discordância entre valores é ainda mais acentuada que no caso anterior, com uma diferença no cálculo das áreas áridas de 13 841,86 ha, correspondendo a uma subestimação de cerca de 36,07% face ao identificado com base na imagem SPOT. Quanto às áreas não áridas, verifica-se uma sobrestimação nos valores obtidos pelo domínio VIS+NIR+1SWIR na ordem dos 10,20%.

**Tabela 13:** Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR+1SWIR (áreas em ha).

| Delimitação SPOT-7 / VIS+NIR+1SWIR |                  |                   |                   |
|------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Matriz Confusão                    | Ardido [SPOT]    | Não Ardido [SPOT] | Total             |
| Ardido [Sentinel-2A]               | 24 175,17        | 359,78            | 24 534,95         |
| Não Ardido [Sentinel-2A]           | 14 201,64        | 135 364,84        | 149 566,48        |
| <b>Total</b>                       | <b>38 376,81</b> | <b>135 724,62</b> | <b>174 101,43</b> |

Para o terceiro domínio espectral considerado (VIS+NIR+2SWIR), a comparação com os resultados da imagem SPOT-7 (Tabela 14), verifica-se novamente uma subestimação da área árida de cerca de 47,10% e uma sobrestimação de 13,32% da área não árida.

**Tabela 14:** Matriz confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e VIS+NIR+2SWIR (áreas em ha).

| Delimitação SPOT-7 / VIS+NIR+2SWIR |                  |                   |                   |
|------------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Matriz Confusão                    | Ardido [SPOT]    | Não Ardido [SPOT] | Total             |
| Ardido [Sentinel-2A]               | 20 239,86        | 60,99             | 20 300,86         |
| Não Ardido [Sentinel-2A]           | 18 136,95        | 135 663,62        | 153 800,57        |
| <b>Total</b>                       | <b>38 376,81</b> | <b>135 724,62</b> | <b>174 101,43</b> |

É possível verificar que para todos os conjuntos se verificou uma subestimação das áreas áridas e uma consequente sobrestimação das áreas não áridas comparativamente à delimitação realizada com base na imagem SPOT-7. A discrepância de valores foi mais acentuada para os resultados obtidos com o domínio espectral VIS+NIR+2SWIR correspondendo a um valor de 18 075,95 ha face à área calculada com base na imagem SPOT-7.

A Tabela 15 sintetiza os valores de exatidão global, coeficiente k, área árida, erros de comissão e omissão. A comparação que obteve maior concordância nos valores obtidos foi a realizada com o domínio espectral VIS+NIR sendo a que apresenta maior exatidão global com um valor de 94,31%. Relativamente ao erro de comissão da área árida, houve uma percentagem de 1,15% da área árida erradamente classificada. Quanto ao erro de omissão, 24,95% da área árida ficou por classificar.

A representação espacial desta comparação de valores do grupo espectral VIS+NIR com os dados da delimitação na imagem SPOT-7 encontra-se na Figura 20.

**Tabela 15:** Valores de exatidão global, coeficiente k, áreas áridas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre a delimitação na imagem SPOT-7 e resultados derivados dos limiares com base nos índices pré e pós-fogo.

| Delimitação SPOT-7 / Grupos Espectrais |              |                   |                 |              |            |             |            |
|--|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|
| Limiares com Base nos Índices          | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Árida (ha) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|  |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| <b>VIS+NIR</b>                         | 94,31        | 81,87             | 28.801,53       | 1,15         | 6,61       | 24,95       | 0,25       |
| <b>VIS+NIR+1SWIR</b>                   | 91,64        | 72,05             | 24.175,17       | 1,47         | 9,50       | 37,01       | 0,27       |
| <b>VIS+NIR+2SWIR</b>                   | 89,55        | 63,40             | 20.239,86       | 0,30         | 11,79      | 47,26       | 0,04       |

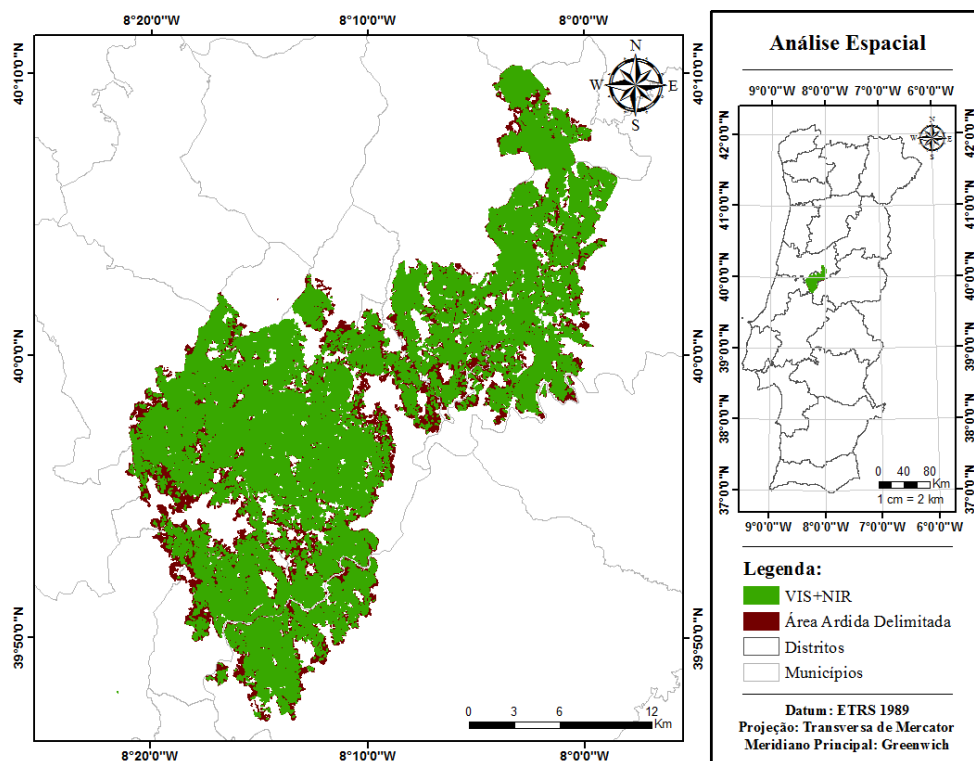


Figura 20: Representação espacial da área árida delimitada manualmente e a área árida do VIS+NIR.

## 4.2.2. Classificadores automáticos

Devido ao número elevado de testes realizados, nesta subsecção serão apresentados apenas os valores referentes aos melhores testes para os algoritmos da máxima verosimilhança e rede neuronal para cada satélite (Sentinel-2 Nível-1C, Sentinel-1 e conjugação dos dois anteriores), encontrando-se os restantes valores no Anexo B.

Como referido na subsecção 3.3.2.1 foram seguidas duas abordagens aritméticas distintas (razão e diferença de índices) e nas subsecções serão apresentados os três melhores testes para cada uma das abordagens.

### 4.2.2.1 Máxima Verosimilhança

Relativamente aos dados do Sentinel-2 Nível-1C, o teste m3.0, com a operação aritmética da diferença de índices  $NBR_L$ ,  $BAIM_L$  e  $MIRBI$ , foi o que produziu a maior exatidão global (96,11%) e o maior valor para o coeficiente k (89,25%), evidenciando um grande nível de concordância entre os valores (Tabela 16).

O teste M4.0, com a operação aritmética da razão de todos os índices, produziu também uma elevada exatidão global (95,96%) e um valor de 88,88% para o coeficiente k. Os dois testes restantes (M3.0 e M6.0) registaram valores para a exatidão global e para o coeficiente k superiores aos obtidos na operação da diferença com os testes m2.0 e m5.0.

**Tabela 16:** Valores dos três melhores testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 Nível-1C |            |              |                   |                 |              |            |             |            |
|---------------------|------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|
|                     | Designação | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|                     |            |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| <b>Razão</b>        | M4.0       | 95,96        | 88,88             | 98,13           | 14,27        | 0,56       | 1,87        | 4,66       |
|                     | M3.0       | 95,73        | 88,23             | 97,33           | 14,54        | 0,79       | 2,67        | 4,72       |
|                     | M6.0       | 95,57        | 87,92             | 98,61           | 15,84        | 0,42       | 1,39        | 5,30       |
| <b>Diferença</b>    | m3.0       | 96,11        | 89,25             | 97,89           | 13,60        | 0,63       | 2,11        | 4,39       |
|                     | m2.0       | 94,90        | 86,24             | 98,73           | 18,02        | 0,38       | 1,27        | 6,19       |
|                     | m5.0       | 94,04        | 84,14             | 98,83           | 20,62        | 0,36       | 1,17        | 7,32       |

Analogamente à análise realizada para os dados do Sentinel-2, para o Sentinel-1, em termos de exatidão global e de coeficiente k, os valores obtidos para a exatidão global e coeficiente k foram consideravelmente inferiores como é possível observar na Tabela 17. O teste 11.0 (diferença das 2 polarizações) produziu a maior exatidão global (73,09 %), e de 32,82% para o coeficiente k, evidenciando uma baixa concordância de valores e um decréscimo substancial face aos resultados obtidos com o Sentinel-2. Relativamente aos erros de comissão e omissão, os valores apresentados são bastante superiores aos da Tabela 16. Estabelecendo uma comparação, para o teste 11.0, o erro de comissão para a área ardida é de 57,34 % e o erro de omissão é de 38,25%.

**Tabela 17:** Valores dos testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1       |            |              |                   |                 |              |            |             |            |
|------------------|------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|
|                  | Designação | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|                  |            |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| <b>Razão</b>     | L1.0       | 72,62        | 32,10             | 61,78           | 57,98        | 12,57      | 38,22       | 24,29      |
| <b>Diferença</b> | 11.0       | 73,09        | 32,82             | 61,75           | 57,34        | 12,51      | 38,25       | 23,68      |

Tendo em consideração a conjugação dos dados dos dois satélites (Sentinel-2 e Sentinel-1), os resultados obtidos tanto para a operação da razão como da diferença, produziram valores de exatidão sempre superiores a 94% e valores de coeficiente k superiores a 84%, como demonstrado na Tabela 18. A melhor exatidão global (96,17 %) e respetivo coeficiente k (89,40 %) foram obtidos com o teste e3.0, valores estes ligeiramente superiores aos obtidos pelo teste m3.0 apenas com os dados do Sentinel-2. O valor mais elevado obtido para o erro de comissão foi registado no teste e6.0 (20,66%), apenas 0,04% acima do valor máximo registado para este erro com os dados do Sentinel-2 (teste m5.0).



**Tabela 18:** Valores dos três melhores testes de máxima verosimilhança para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2 Nível-1C e Sentinel-1 |              |                   |                 |              |            |             |            |      |
|----------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|------|
| Designação                       | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |      |
|                                  |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |      |
| <b>Razão</b>                     | E4.0         | 95,95             | 88,87           | 98,32        | 14,41      | 0,50        | 1,68       | 4,72 |
|                                  | E6.0         | 95,83             | 88,57           | 98,56        | 14,97      | 0,43        | 1,44       | 4,95 |
|                                  | E3.0         | 95,76             | 88,31           | 97,49        | 14,55      | 0,75        | 2,51       | 4,74 |
| <b>Diferença</b>                 | e3.0         | 96,17             | 89,40           | 97,97        | 13,46      | 0,60        | 2,03       | 4,35 |
|                                  | e2.0         | 94,98             | 86,45           | 98,81        | 17,82      | 0,36        | 1,19       | 6,11 |
|                                  | e6.0         | 94,10             | 84,34           | 99,29        | 20,66      | 0,22        | 0,71       | 7,38 |

Comparando os três conjuntos de resultados acima analisados para o algoritmo da máxima verosimilhança (Tabelas 16, 17 e 18), o que produziu melhores valores de exatidão global, coeficiente k, erros de comissão para a área ardida e de omissão para a área não ardida foi o teste e3.0 (diferença dos índices NBR<sub>L</sub>, BAIM<sub>L</sub>, MIRBI e das 2 polarizações).

#### 4.2.2.2 Rede Neuronal

Para os dados provenientes do Sentinel-2 Nível-1C, o teste r4.1, a operação aritmética da diferença de todos os índices com os parâmetros do teste 1, foi o que produziu a maior exatidão global (96,98%) e maior valor para o coeficiente k (91,46%), evidenciando um grande nível de concordância entre os valores, como se demonstra na Tabela 19.

O teste R1.1, a operação aritmética da razão dos índices NDVI, GEMI e BAI com os parâmetros do teste, devolveu uma exatidão global de 96,47% e um valor de 90,07% para o coeficiente k. Os dois testes restantes (R1.2 e R1.3) registaram valores de exatidão global e para o coeficiente k inferiores aos obtidos na operação da diferença.

**Tabela 19:** Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 (Nível-1C) |              |                   |                 |              |            |             |            |      |
|-----------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|------|
| Designação            | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |      |
|                       |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |      |
| <b>Razão</b>          | R1.1         | 96,47             | 90,07           | 96,17        | 11,16      | 1,12        | 3,83       | 3,45 |
|                       | R1.2         | 96,39             | 89,62           | 92,68        | 8,79       | 2,10        | 7,32       | 2,55 |
|                       | R1.3         | 96,39             | 89,62           | 92,68        | 8,79       | 2,10        | 7,32       | 2,55 |
| <b>Diferença</b>      | r3.2         | 96,98             | 91,36           | 94,95        | 8,27       | 1,45        | 5,05       | 2,44 |
|                       | r3.3         | 96,98             | 91,36           | 94,95        | 8,27       | 1,45        | 5,05       | 2,44 |
|                       | r4.1         | 96,98             | 91,46           | 96,65        | 9,61       | 0,97        | 3,35       | 2,93 |

Relativamente aos resultados obtidos com os dados provenientes do Sentinel-1, observa-se, à semelhança do verificado no algoritmo de máxima verosimilhança, um decréscimo muito significativo nos valores de exatidão global e coeficiente k, cujo valor mais elevado foi de 30,88% no teste a1.1, o qual corresponde à

diferença de polarizações com os parâmetros do teste 1 (Tabela 20). Foram verificados também valores muito elevados tanto para os erros de comissão como para os erros de omissão, registando-se sempre valores acima de 50% para os erros de comissão das áreas ardidas e acima de 18% para os erros de omissão.

**Tabela 20:** Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1       |              |                   |                 |              |            |             |            |       |
|------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|-------|
| Designação       | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |       |
|                  |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |       |
| <b>Razão</b>     | A1.2         | 74,45             | 30,07           | 50,59        | 56,54      | 14,77       | 49,41      | 18,75 |
|                  | A1.3         | 74,45             | 30,07           | 50,59        | 56,54      | 14,77       | 49,41      | 18,75 |
|                  | A1.5         | 70,49             | 27,92           | 59,49        | 60,88      | 13,55       | 40,51      | 26,38 |
| <b>Diferença</b> | a1.1         | 69,83             | 30,88           | 68,96        | 60,34      | 11,22       | 31,04      | 29,92 |
|                  | a1.6         | 64,65             | 24,24           | 69,48        | 64,95      | 12,09       | 30,52      | 36,73 |
|                  | a1.5         | 53,15             | 16,45           | 81,70        | 70,24      | 10,39       | 18,30      | 55,00 |

Considerando os resultados obtidos com a conjugação de dados dos dois satélites (Sentinel-2 e Sentinel-1), observam-se os valores de exatidão global mais elevados obtidos para todos os testes analisados, com um valor de 97,04%, como apresentado na Tabela 21. O teste n3.5, diferença dos índices NBR<sub>L</sub>, BAIM<sub>L</sub>, MIRBI e as 2 polarizações com os parâmetros do teste 5, apresentou o valor de coeficiente k mais elevado (91,61%), não obstante, apresentou valores para os erros de comissão e omissão ligeiramente superiores (na ordem das décimas) aos registados para o teste n3.4.

**Tabela 21:** Valores dos três melhores testes de rede neuronal para a razão e diferença, exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |              |                   |                 |              |            |             |            |      |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|------------|-------------|------------|------|
| Designação                         | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |      |
|                                    |              |                   |                 | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |      |
| <b>Razão</b>                       | N5.4         | 96,28             | 89,52           | 95,45        | 11,34      | 1,33        | 4,55       | 3,48 |
|                                    | N1.6         | 95,22             | 85,53           | 83,09        | 5,26       | 4,66        | 16,91      | 1,32 |
|                                    | N1.5         | 92,50             | 80,56           | 99,55        | 25,10      | 0,14        | 0,45       | 9,52 |
| <b>Diferença</b>                   | n3.5         | 97,04             | 91,61           | 96,17        | 8,97       | 1,11        | 3,83       | 2,71 |
|                                    | n3.4         | 97,04             | 91,58           | 95,63        | 8,56       | 1,26        | 4,37       | 2,55 |
|                                    | n6.4         | 96,88             | 91,28           | 97,77        | 10,77      | 0,65        | 2,23       | 3,37 |

Fazendo uma análise comparativa para os resultados provenientes dos dados dos satélites Sentinel-2 e Sentinel-1 e dos dois em conjunto (Tabelas 19, 20 e 21, respetivamente), verifica-se a mesma tendência verificada para o algoritmo da máxima verosimilhança. Tal significa que a obtenção de melhores resultados de exatidão global e de coeficiente k se registaram no teste n3.5 com os dados provenientes dos dois satélites conjuntamente e com a operação aritmética da diferença.

### 4.3. VALIDAÇÃO COM OS DADOS DO ICNF

Esta secção apresenta a análise das matrizes de confusão de cada grupo espectral e dos métodos de classificação automática (testes da máxima verosimilhança e rede neuronal) realizados anteriormente que produziram a melhor exatidão com as respetivas áreas ardidas calculadas pelo ICNF. Para a área de estudo abrangida por este projeto, o cálculo do ICNF identificou uma área ardida de 47 992,18 ha e um valor de área não ardida de 126 109,25 ha perfazendo um total de 174 101,43 ha de área analisada.

#### 4.3.1. Limiares com base nos índices pré e pós-incêndios

As Tabelas 22, 23 e 24 apresentam, respetivamente a comparação entre os dados do ICNF e os domínios espectrais VIS+NIR, VIS+NIR+1SWIR, VIS+NIR+2SWIR.

Comparando os valores do grupo espectral VIS+NIR (Tabela 22) com os obtidos pelo ICNF, é possível verificar uma discrepância na aferição das áreas ardidas e não ardidas. Os valores calculados pelo domínio VIS+NIR apresentam uma subestimação na ordem dos 39,29% face aos valores obtidos pelo ICNF relativamente à área ardida. No que concerne à área não ardida, os resultados da classificação apresentam uma sobrestimação de cerca de 14,95%.

**Tabela 22:** Matriz confusão entre os do ICNF e VIS+NIR (áreas em ha).

| Dados ICNF / VIS+NIR     |               |                   |            |
|--------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão          | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [Sentinel-2A]     | 29 099,67     | 36,66             | 29 136,33  |
| Não Ardido [Sentinel-2A] | 18 892,51     | 126 072,59        | 144 965,10 |
| <b>Total</b>             | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |

Relativamente à comparação com o grupo espectral VIS+NIR+1SWIR apresentada na Tabela 23, a discordância entre valores é ainda mais acentuada que no caso anterior, com uma diferença no cálculo das áreas ardidas de 23 840,06 ha (VIS+NIR+1SWIR) para 47 992,18 ha (ICNF), correspondendo a uma subestimação de cerca de 48,88% face aos resultados apresentados pelo ICNF. Na aferição das áreas não ardidas, esta tendência continua a verificar-se, correspondendo os valores obtidos pelo domínio VIS+NIR+1SWIR a uma sobrestimação na ordem dos 18,60%.

**Tabela 23:** Matriz confusão entre os dados do ICNF e VIS+NIR+1SWIR (áreas em ha).

| Dados ICNF / VIS+NIR+1SWIR |               |                   |            |
|----------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão            | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [Sentinel-2A]       | 24 495,31     | 39,64             | 24 534,95  |
| Não Ardido [Sentinel-2A]   | 23 496,88     | 126 069,60        | 149 566,48 |
| <b>Total</b>               | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |

Para o terceiro domínio espectral considerado (VIS+NIR+2SWIR), a comparação com os dados do ICNF apresenta-se na Tabela 24, onde se verifica novamente uma diferença proeminente entre os valores. Na aferição da área ardida, observa-se uma subestimação da área na ordem dos 57,70% comparativamente aos

valores propostos pelo ICNF, enquanto que para a área não ardida volta a verificar-se uma sobrestimação na ordem dos 21,96%.

**Tabela 24:** Matriz confusão entre os dados do ICNF e VIS+NIR+2SWIR (áreas em ha).

| Dados ICNF / VIS+NIR+2SWIR |               |                   |            |
|----------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão            | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [Sentinel-2A]       | 20 288,80     | 12,05             | 20 300,86  |
| Não Ardido [Sentinel-2A]   | 27 703,38     | 126 097,19        | 153 800,57 |
| <b>Total</b>               | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |

Da análise dos três conjuntos de dados apresentados, é possível verificar que em todos existiu uma subestimação das áreas ardidas e uma consequente sobrestimação das áreas não ardidas comparativamente às áreas calculadas pelo ICNF. A divergência de valores foi mais acentuada para os resultados obtidos com o domínio espectral VIS+NIR+2SWIR correspondendo a um valor de 27 691,32 ha face à área calculada pelo ICNF.

A Tabela 25 sintetiza os valores de exatidão global, coeficiente k, área ardida, erros de comissão e omissão. A comparação que obteve maior proximidade nos valores obtidos foi a realizada com o domínio espectral VIS+NIR e como tal, é a que apresenta maior exatidão global com um valor de 89,13%. Relativamente ao erro de comissão da área ardida, houve uma percentagem de 0,13% da área incorretamente identificada como área ardida. Quanto ao erro de omissão, foi obtido um valor de 39,37%, significando que esta foi a percentagem de área ardida que ficou por classificar.

A representação espacial desta comparação de valores do grupo espectral VIS+NIR com os dados do ICNF encontra-se na Figura 21.

**Tabela 25:** Valores de exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e resultados derivados dos limiares com base nos índices pré e pós-fogo.

| Dados ICNF / Grupos Espetrais |              |                   |                  |              |            |             |            |
|-------------------------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------|
| Limiares com Base nos Índices | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (ha) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|                               |              |                   |                  | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| <b>VIS+NIR</b>                | 89,13        | 69,00             | 29 099,67        | 0,13         | 13,03      | 39,37       | 0,03       |
| <b>VIS+NIR+1SWIR</b>          | 86,48        | 60,11             | 24 495,31        | 0,16         | 15,71      | 48,96       | 0,03       |
| <b>VIS+NIR+2SWIR</b>          | 84,08        | 51,46             | 20 288,80        | 0,06         | 18,01      | 57,72       | 0,01       |

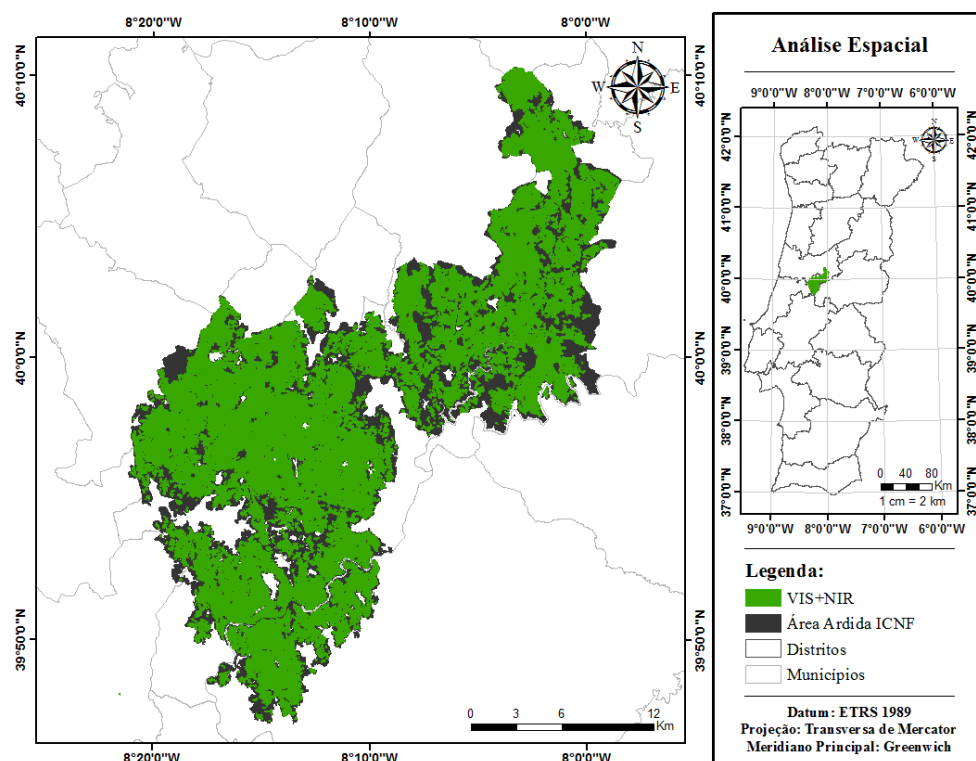


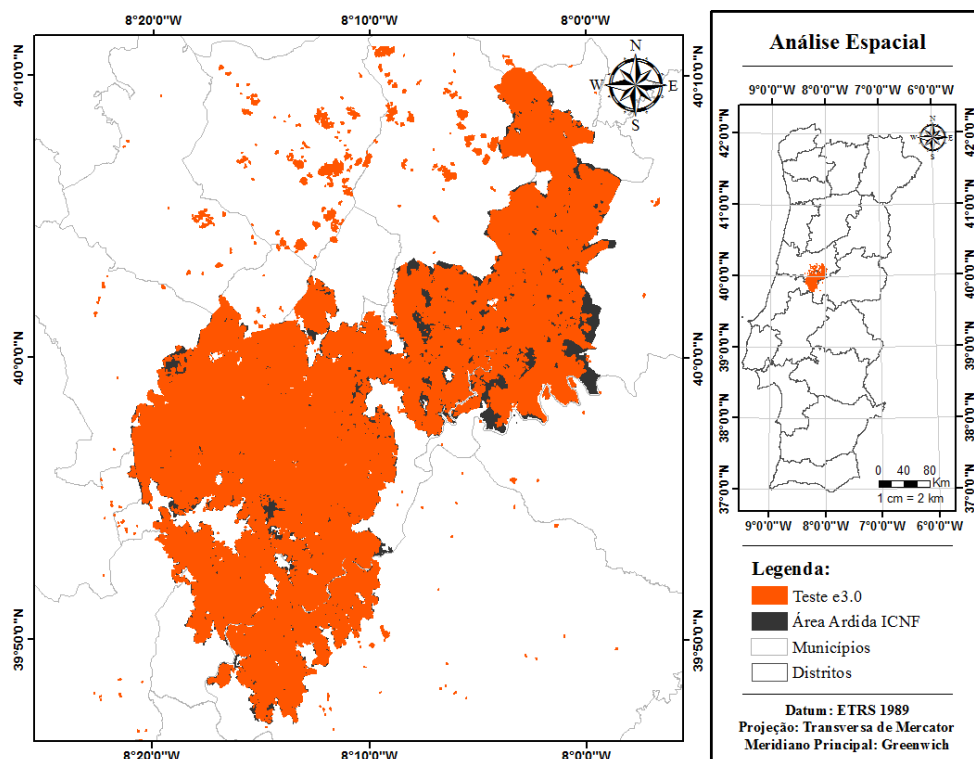
Figura 21: Representação espacial da área árida calculada pelo ICNF e a área árida do VIS+NIR.

#### 4.3.2. Classificadores automáticos

De todos os testes realizados com a máxima verosimilhança, o que obteve melhor exatidão global foi o teste e3.0, onde se verificou uma área árida calculada de 42 320,84 ha contrastando com 47 992,18 ha calculados pelo ICNF. Relativamente à área não árida, com o mesmo algoritmo obteve-se um valor de 131 780,59 ha enquanto o valor apresentado pelo ICNF foi inferior em cerca de 5 600 ha. A Tabela 26 representa a matriz confusão e a representação espacial da comparação do teste e3.0 relativamente aos dados calculados pelo ICNF encontra-se na Figura 22.

Tabela 26: Matriz confusão entre os dados do ICNF e os dados resultantes do algoritmo máxima verosimilhança (áreas em ha).

| Dados ICNF – Teste e3.0  |               |                   |            |
|--------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão          | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [Sentinel-2A]     | 41 886,46     | 434,38            | 42 320,84  |
| Não Ardido [Sentinel-2A] | 6 105,72      | 125 674,87        | 131 780,59 |
| Total                    | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |



**Figura 22:** Representação espacial da área árida calculada pelo ICNF e a área árida detetada pelo algoritmo máxima verossimilhança.

Relativamente ao erro de comissão da área árida, verificou-se que 1,03% da área foi incorretamente identificada como área árida. Quanto ao erro de omissão, obteve-se um valor de 12,72%, significando que esta foi a percentagem de área não classificada, como se verifica na Tabela 27. É possível identificar que a área efetivamente árida que tem um valor de 41 886,46 ha, representando uma exatidão global de 96,24%.

**Tabela 27:** Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas áridas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e os resultados derivados do algoritmo máxima verossimilhança.

| Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Árida (ha) | Comissão (%) |           | Omissão (%) |           |
|--------------|-------------------|-----------------|--------------|-----------|-------------|-----------|
|              |                   |                 | Árido        | Não Árido | Árido       | Não Árido |
| 96,24        | 90,24             | 41 886,46       | 1,03         | 4,63      | 12,72       | 0,34      |

Nos testes realizados com o algoritmo de rede neuronal, o que obteve melhor exatidão global foi o teste n3.5. Neste teste obteve-se uma área árida de 40 583,36 ha, contrastando com 47 992,18 ha propostos pelo ICNF. Relativamente à área não árida, com este algoritmo obteve-se um valor de 133 518,07 ha enquanto o valor apresentado pelo ICNF foi inferior em cerca de 7 400 ha. A Tabela 28 representa a matriz confusão e a representação espacial da comparação do teste n3.5 relativamente aos dados calculados pelo ICNF encontra-se na Figura 23.

Tabela 28: Matriz confusão entre os dados do ICNF e os dados resultantes do algoritmo rede neuronal (áreas em ha).

| Dados ICNF – Teste n3.5  |               |                   |            |
|--------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão          | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [Sentinel-2A]     | 40 349,12     | 234,24            | 40 583,36  |
| Não Ardido [Sentinel-2A] | 7 643,06      | 125 875,00        | 133 518,07 |
| Total                    | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |

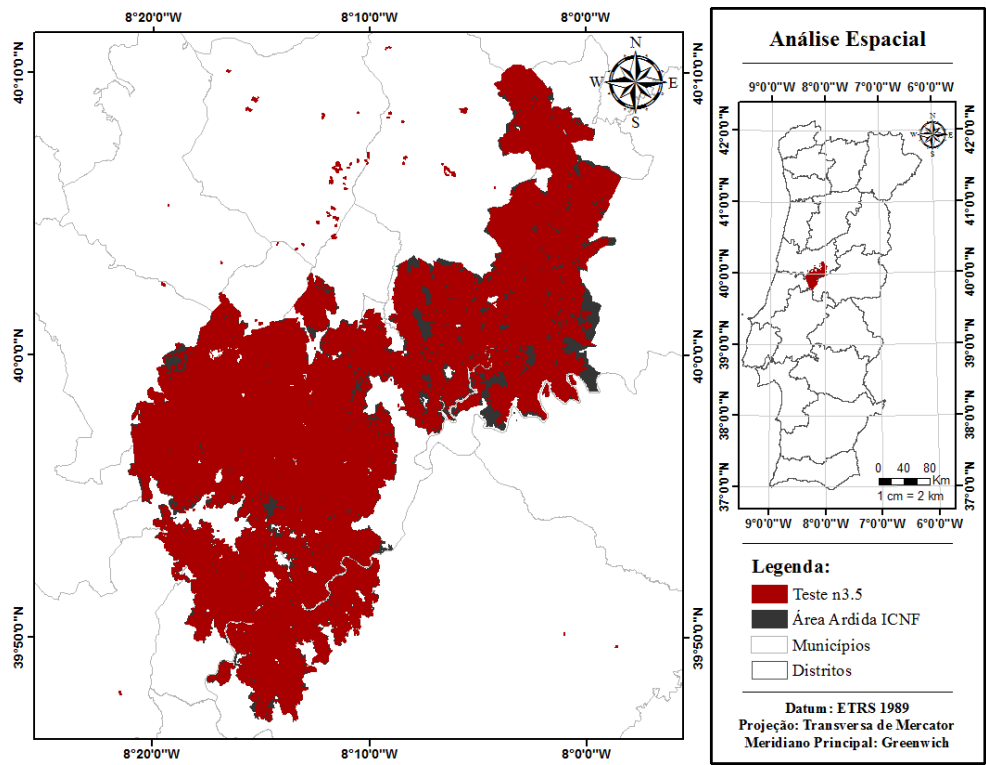


Figura 23: Representação espacial da área ardida calculada pelo ICNF e a área ardida detetada pelo algoritmo rede neuronal.

Os valores referentes à exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão estão representados na Tabela 29. É possível identificar a área efetivamente ardida apresentando um valor de 40 349,12 ha, representando uma exatidão de 95,48%. Relativamente ao erro de comissão da área ardida, verificou-se que 0,58% da área foi incorretamente identificada como área ardida. Quanto ao erro de omissão, obteve-se um valor de 15,93%.

Tabela 29: Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados do ICNF e os resultados derivados do algoritmo rede neuronal.

| Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (ha) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|--------------|-------------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------|
|              |                   |                  | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| 95,48        | 88,10             | 40 349,12        | 0,58         | 5,72       | 15,93       | 0,19       |

Comparando os dois métodos de classificação automática acima mencionados (máxima verosimilhança e rede neuronal), é possível aferir que com o algoritmo da máxima verosimilhança, os valores de exatidão (96,24%) e do coeficiente k (90,24%) foram superiores aos obtidos com o algoritmo da rede neuronal (95,48% e 88,10%, respetivamente).

No que concerne à avaliação dos erros de comissão para a área ardida, o método da máxima verosimilhança obteve um valor superior comparativamente com a rede neuronal (1,03% contrastando com 0,58%), indicando que existiu uma percentagem de 1,03% de falsas deteções de área efetivamente ardida. Para a área não ardida, o valor de erros de comissão foi superior no algoritmo da rede neuronal.

Relativamente aos erros de omissão para área ardida, o algoritmo da rede neuronal foi o que obteve o valor mais elevado, com uma percentagem de 15,93%, cerca de 3% acima do obtido com o algoritmo da máxima verosimilhança.

#### 4.4. COMPARAÇÃO DAS ÁREAS ARDIDAS DA IMAGEM SPOT-7 E ICNF

Nesta subsecção será apresentada a análise da matriz de confusão da área calculada pelo ICNF com a delimitação da área ardida na imagem SPOT-7.

Analisando os valores representados na Tabela 30, verifica-se que a área ardida identificada pelo ICNF é superior à delimitação efetuada na imagem SPOT-7 em 20%. Relativamente à área não ardida verifica-se o oposto, com o valor apresentado pelo ICNF 7,62% abaixo do valor proveniente da delimitação da imagem SPOT-7. O valor de área ardida resultante da intersecção dos dados provenientes do ICNF com a delimitação da área ardida na imagem SPOT-7 é de 38 213,39 ha e o valor de área não ardida resultante da mesma operação é de 125 945,83 ha.

**Tabela 30:** Matriz confusão dos dados provenientes do ICNF com a delimitação efetuada na imagem SPOT-7 (áreas em ha).

| Dados ICNF / Delimitação SPOT-7 |               |                   |            |
|---------------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Matriz Confusão                 | Ardido [ICNF] | Não Ardido [ICNF] | Total      |
| Ardido [SPOT-7]                 | 38 213,39     | 163,42            | 38 376,81  |
| Não Ardido [SPOT-7]             | 9 778,79      | 125 945,83        | 135 724,62 |
| <b>Total</b>                    | 47 992,18     | 126 109,25        | 174 101,43 |

A Tabela 31 sintetiza os valores de exatidão global, coeficiente k, área ardida, erros de comissão e omissão. O valor de exatidão global obtido foi de 94,29% com um coeficiente de k de 84,75%, relativamente ao erro de comissão da área ardida houve apenas um valor de 0,43% de área ardida erradamente classificada. No que concerne ao erro de omissão, 20,38% da área ardida ficou por classificar.

**Tabela 31:** Valores obtidos sobre a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão das matrizes de confusão entre os dados provenientes do ICNF com a delimitação efetuada na imagem SPOT-7.

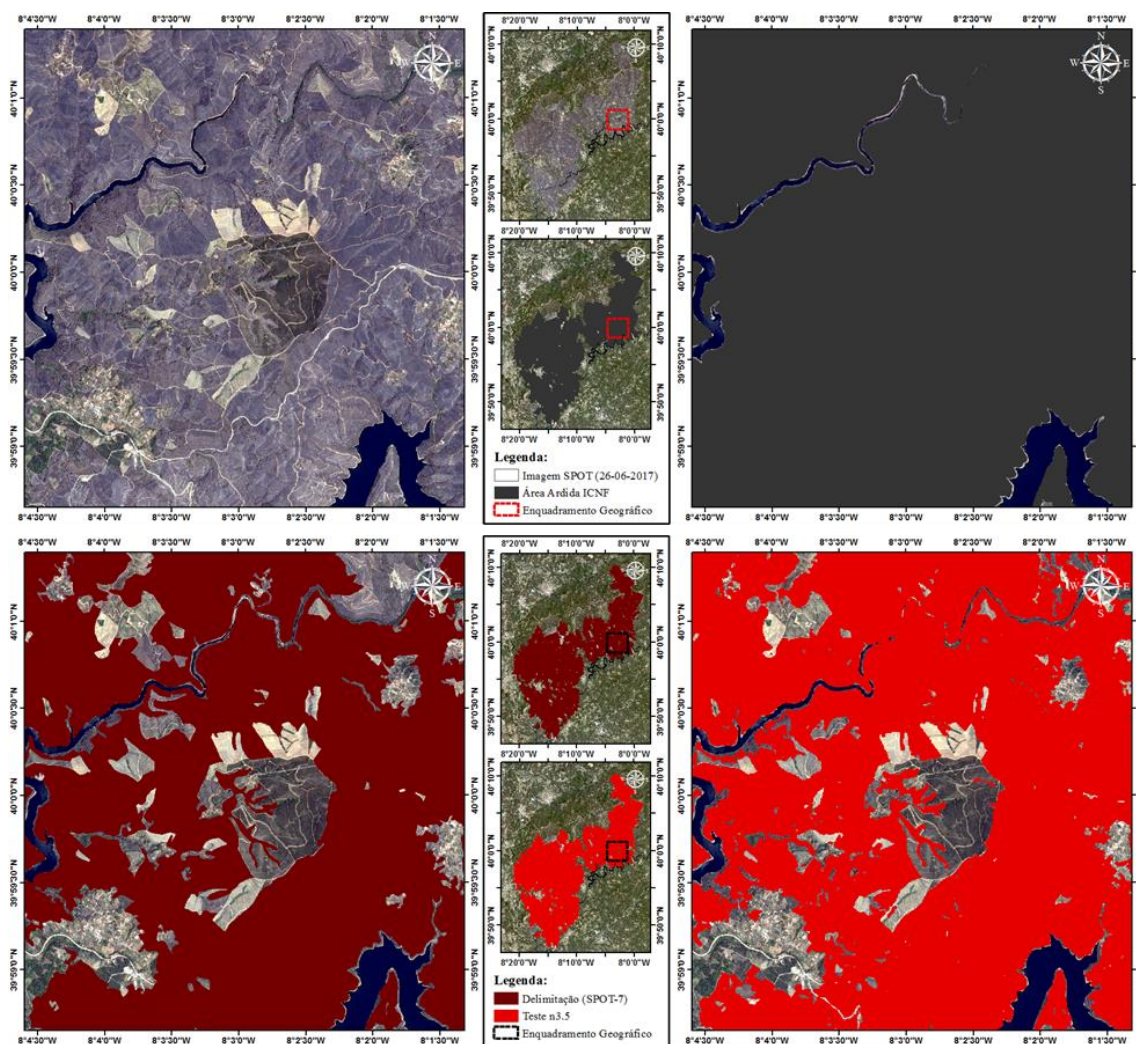
| Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (ha) | Comissão (%) |            | Omissão (%) |            |
|--------------|-------------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------|
|              |                   |                  | Ardido       | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| 94,29%       | 84,75%            | 38 213,39        | 0,43%        | 7,20%      | 20,38%      | 0,13%      |



## 4.5. AFERIÇÃO DAS ÁREAS ÁRIDAS

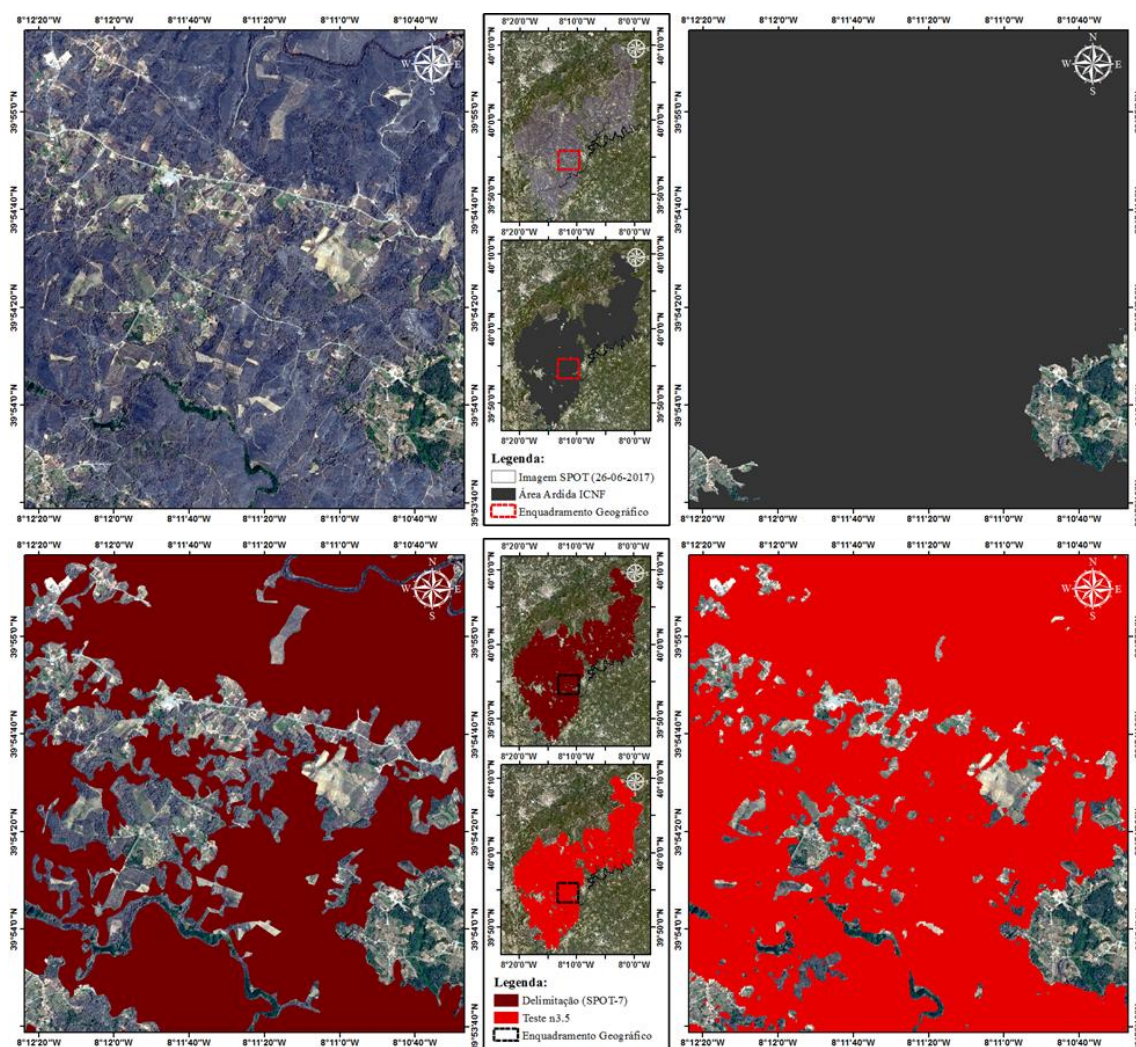
Nesta secção será efetuada uma análise pormenorizada de duas localizações distintas inseridas na área de estudo, denominadas Zona 1 e Zona 2, de modo a identificar as diferenças entre a área árida obtida com o melhor teste (n3.5) com a área árida proposta pelo ICNF e ainda com a delimitação realizada manualmente com base na imagem do satélite SPOT-7 e apresenta-se a imagem real do terreno sem classificações por forma a estabelecer a comparação entre estas (Figuras 24 e 25).

Como se pode verificar na Figura 24, referente à Zona 1, comparando as três imagens em análise, existe uma sobrestimação da área árida por parte do ICNF comparativamente à área delimitada manualmente com base na imagem SPOT-7. Tal é visível na figura, na qual se observa praticamente toda a área preenchida a cinza escuro, sendo apenas identificados os cursos de água com maiores dimensões como área não árida. Comparando os resultados do teste n3.5 com a delimitação manual, estes apresentam um maior nível de pormenorização das zonas não áridas, nomeadamente com a identificação do troço mais estreito do curso de água.



**Figura 24:** Comparação entre as áreas áridas resultantes da melhor classificação automática (Teste.3.5), da área árida calculada pelo ICNF, da delimitação manual da área árida na imagem SPOT-7 com a imagem SPOT-7 (Zona 1).

Relativamente à Zona 2, representada na Figura 25, a estimativa apresentada pelo ICNF volta a apresentar-se grosseira dado que vários agregados populacionais de pequena dimensão foram omitidos. Analogamente ao observado na Zona 1, a classificação automática recorrendo ao teste n3.5 apresenta uma melhor identificação das áreas áridas e não áridas quando comparada com a respetivas áreas na delimitação manual da imagem SPOT-7.



**Figura 25:** Comparação entre as áreas áridas resultantes da melhor classificação automática (Teste.3.5), da área árida calculada pelo ICNF, da delimitação manual da área árida na imagem SPOT-7 com a imagem SPOT-7 (Zona 2).

## Capítulo 5 - CONCLUSÕES

---

Este estudo pretendeu elaborar a cartografia das áreas ardidas na região centro de Portugal continental no mês de junho do ano de 2017, analisando a complementaridade das imagens adquiridas pelos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2.

Os resultados obtidos dos algoritmos de classificação de imagem automáticos e a aplicação dos limiares pré e pós-incêndios foram validados com a área ardida identificada e calculada pelo ICNF e com a delimitação executada manualmente com base na imagem do satélite SPOT-7.

A delimitação efetuada manualmente na imagem do satélite SPOT-7 originou uma área ardida de 38 376,81 ha na região analisada, servindo de base de validação para as áreas provenientes dos diversos testes realizados. A área ardida identificada pelo ICNF para o espaço temporal em análise teve um valor de 47 992,18 ha.

Relativamente à validação com a delimitação executada na imagem SPOT-7, no que concerne à utilização dos limiares com base nos índices pré e pós-incêndio, a comparação efetuada com o domínio espectral VIS+NIR foi a que apresentou maior exatidão global com um valor de 94,31%. Quanto aos erros de comissão, houve uma percentagem de 1,15% de área erradamente classificada como ardida e 24,95% de área que ficou por classificar. Em relação à validação com os dados dos satélites Sentinel-2, Sentinel-1 e dos dois conjuntamente, os melhores resultados para a exatidão global e para o coeficiente k (97,04% e 91,61%, respetivamente) registaram-se com o algoritmo de rede neuronal e com a operação aritmética da diferença de índices, com as imagens obtidas pelos dois satélites conjuntamente.

A validação com os dados provenientes do ICNF com a utilização dos limiares com base nos índices, permitiu verificar novamente que a comparação com o domínio espectral VIS+NIR é a que apresenta melhores valores de exatidão global, obtendo um valor de 89,13%. Relativamente aos erros de comissão, verificou-se que apenas 0,13% da área não ardida foi classificada como ardida. No que concerne aos erros de omissão, obteve-se um valor de 39,37%, indicando que esta foi a percentagem de área por classificar. Na validação com os testes de classificação automática (máxima verosimilhança e rede neuronal), o algoritmo da máxima verosimilhança obteve os melhores resultados com um valor de exatidão de 96,24% e para o coeficiente k de 90,24%, contrastando com uma exatidão global de 95,48% e um coeficiente k de 88,10%, para o algoritmo de rede neuronal.

De acordo com os resultados obtidos, é possível aferir que a área ardida identificada pelo ICNF foi, de um modo geral, sobrestimada em cerca de 20% face à área delimitada visualmente na imagem do satélite SPOT-7 (assumida como a verdade observada do terreno).

## 5.1. PERSPETIVAS FUTURAS

Na área da deteção remota, os esforços mais recentes têm-se centrado no mapeamento de áreas ardidas e da severidade dos incêndios, tanto em pequenas como em largas escalas. O lançamento de novos satélites tem fornecido os avanços necessários para caracterizar os efeitos temporais e espaciais dos incêndios. A possível sinergia entre os satélites pré-existent e os mais recentes possibilitará também uma melhoria na aquisição de dados.

A distribuição e quantificação das áreas ardidas e da severidade dos incêndios não é homogénea, variando com as condições biofísicas e traduzindo-se em desafios para a deteção remota dos efeitos dos incêndios. As imagens de média a elevada resolução fornecidas pelos sensores do Landsat fornecem a observação mais detalhada e amplamente utilizada para a aferição da severidade das áreas ardidas. Apesar de as imagens fornecidas pelo satélite Landsat TM (30 m) representarem dados de elevada qualidade, a existência de resoluções espaciais ao nível do metro providenciariam mais informação acerca das mudanças de dinâmica nas copas de cada árvore individualmente, bem como da restante vegetação circundante.

Não obstante, é também necessária a existência de uma ligação entre os dados espectrais e as medidas quantitativas para calcular com maior exatidão os efeitos dos incêndios e da sua severidade nos solos. Como tal, os estudos futuros na área da deteção remota deverão dar maior enfoque à caracterização ecológica dos locais por forma a estabelecer uma relação entre os dados biofísicos e os dados espectrais provenientes da deteção remota.

## REFERÊNCIAS

---

- ArcGIS Desktop. Manage Data. [Online] Disponível: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/sentinel-1-thermal-noise-removal.htm> [Consultado: 06-Set-2018]
- Bastarrika, A., Chuvieco, E., & Martín, M. P. (2011). Remote Sensing of Environment Mapping burned areas from Landsat TM / ETM + data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1003–1012. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- Chuvieco, E., Martin, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110.
- Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F. M., & Martin, P. (2006). Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4).
- Classeval. Basic evaluation measures from the confusion matrix. [Online]. Disponível: <https://classeval.wordpress.com/introduction/basic-evaluation-measures/?fbclid=IwAR3d3eNye2qmSjzfe31s2T3TOc60vK2XQfL4LvrkKjcwCPOH4ZCkvRaxI-Y>. [Consultado: 20-Set-2018]
- Curran, P.J.; Dungan, J.L.; Gholz, H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiol.*1990, 7, 33–48.
- D.G.A.P.P.F. (2017). Relatório provisório de incêndios Florestais 2017, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas. Disponível: <http://www2.icnf.pt/portal/florestas/dfci/Resource/doc/rel/2017/10-rel-prov-1jan-31out-2017.pdf>
- DGT, Direção Geral do Território. Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP). [Online]. Disponível: [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/carta\\_administrativa\\_oficial\\_de\\_portugal\\_caop/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal_caop/) [Consultado: 02-Set-2018]
- ESA, European Space Agency. Copernicus Open Access Hub. [Online] Disponível: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [Consultado: 05-Set-2018]
- ESA, European Space Agency. Sentinel-1. [Online] Disponível: [https://m.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Instrument](https://m.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Instrument) [Consultado: 04-Set-2018]
- ESA, European Space Agency. Sentinel-1. [Online] Disponível: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage> [Consultado: 06-Set-2018]
- ESA, European Space Agency. User Guides,Sentinel-1 SAR, [Online] Disponível: <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/resolutions/level-1-ground-range-detected> [Consultado: 04-Set-2018]
- Extension. Geospatial Technology. [Online] Disponível: <https://articles.extension.org/pages/40214/whats-the-difference-between-a-supervised-and-unsupervised-image-classification> [Consultado: 16-Set-2018]



Extreme Tech. Artificial neural networks are changing the world. What are they?. [Online]. Disponível: <http://www.extremetech.com/extreme/215170-artificial-neural-networks-are-changing-the-world-what-are-they> [Consultado: 20-Set-2018]

Fernández-Manso, A.; Fernández-Manso, O.; Quintano, C. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2016, 50, 170–175

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D. P., Quayle, B., & Justice, C. O. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 113(2), 408–420.

GISGeography. REMOTE SENSING, SPOT Satellite Pour l’Observation de la Terre. [Online]. Disponível: <https://gisgeography.com/spot-satellite-pour-observation-terre/> [Consultado: 04-Set-2018]

Harris Geospatial Solutions. Classification. [Online] Disponível: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/Classification.html> [Consultado: 16-Set-2018]

Harris Geospatial Solutions. Convolution and Morphology Filters. [Online] Disponível: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/ConvolutionMorphologyFilters.html> [Consultado: 26-Set-2018]

ICNF (2013). Espécies arbóreas indígenas em Portugal Continental - Guia de utilização. <http://doi.org/citeulike-article-id:14026712>

ICNF (2017). 10º Relatório Provisório de Incêndios Florestais (01 de janeiro - 31 de outubro) – 2017. Departamento de Gestão e Áreas Públicas e de Proteção Florestal. RIF10/2017

Instituto Nacional de Estatística, Censos. [Online] Disponível: [https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos\\_o\\_que\\_sao](https://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos_o_que_sao) [Consultado: 02-Set-2018]

IPMA (2017). Boletim Climatológico junho 2017.

Key, C. H., & Benson, N. C. (1999). The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. U.S. Department of the Interior, Northern Rocky Mountain Science Centre.

Key, C.; Benson, N. Landscape Assessment: Ground Measure of Severity, the Composite Burn Index; and Remote Sensing of Severity, the Normalized Burn Ratio. In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System; Fort Collins, CO, USA, 2006; pp. 219–279.

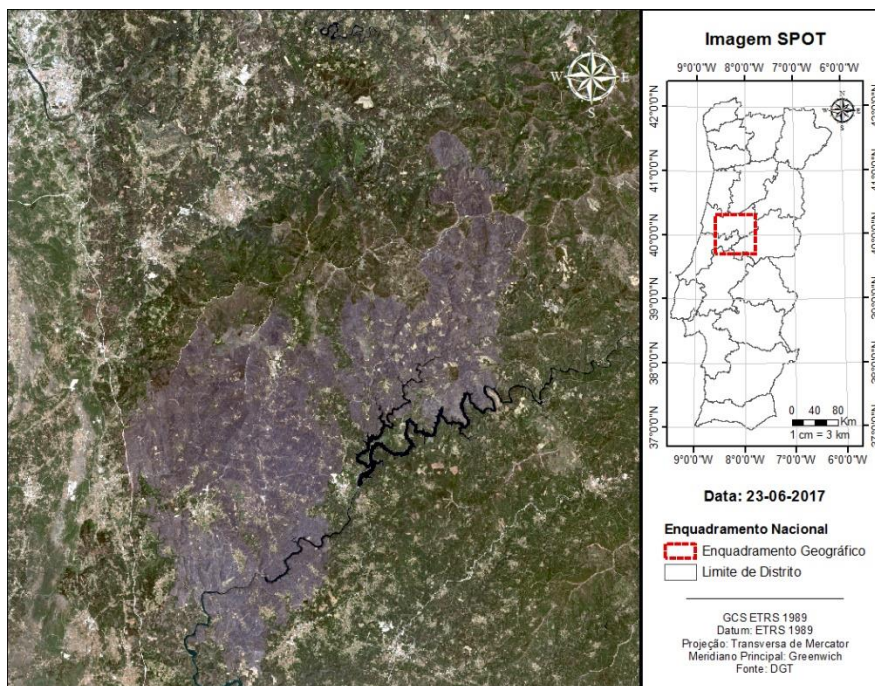
Landis, J. R., & Kosch, G. G. (1977). Landis Jr Kch Gg 1977 Kappa and Observer Agreement, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>

Lentile, L. B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., ... Benson, N. C. (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319–345. <http://doi.org/10.1071/WF05097>

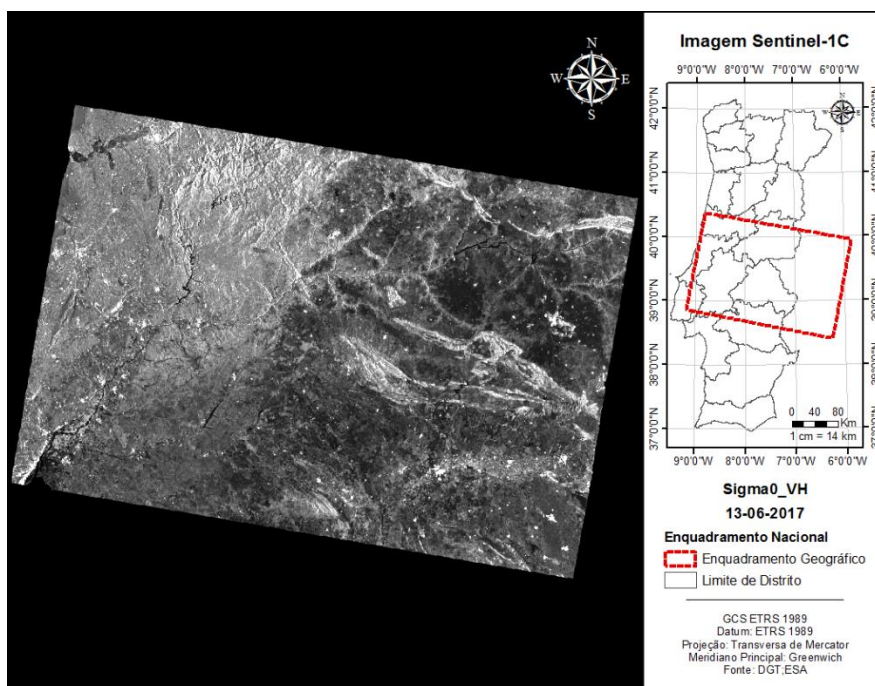
Martín, M. P., Gómez, I., & Chuvieco, E. (2005). Performance of a burned-area index (BAIM) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. In J. Riva, F. Pérez-Cabello, & E. Chuvieco (Eds.), *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment* (pp. 193–198). Paris: Universidad de Zaragoza, GOFC-GOLD, EARSeL.

- Martín, M.P. (1998). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Ph.D. dissertation Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares
- Mustapha, M. R., Lim, H. S., & Mat Jafri, M. Z. (2010). Comparison of neural network and maximum likelihood approaches in image classification. *Journal of Applied Sciences*, 10(22), 2847–2854. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2847.2854>
- Naumann S, (2008). Der Klassifikationsprozess. Einführung in die Fernerkundung - Skriptum. (Heidelberg), 45.
- Naumann S, (2008). Maximum Likelihood Klassifikations-Prinzip. Einführung in die Fernerkundung - Skriptum. (Heidelberg) 45.
- ONU (2017), “Principles and Recommendations for Population and Housing Censuses”. Revision 3. Department of Economic and Social Affairs Statistics Division
- Pinty, B., & Verstraete, M. M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101, 15–20.
- PMEAN. Cohen’s Kappa. [Online]. Disponível: <http://www.pmean.com/definitions/kappa.htm> [Consultado: 24-Set-2018]
- Pyne, S., & Goldammerl, J. G. (1997). The Culture of Fire: An Introduction to Anthropogenic Fire History StephenJ. Pyne and Johann G. Goldammer. *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change, I*, 71–114.
- Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Fernández-Manso, O. Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2018, 64, 221–225.
- APA, Relatório do Estado do Ambiente. Riscos ambientais. [Online]. Disponível: <https://rea.apambiente.pt/content/inc%C3%AAndios-florestais> [Consultado: 18-Nov-2018]
- Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA: NASA/GSFC.
- S. Escuin., R. Navarro & P. Fernández (2008): Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images, *International Journal of Remote Sensing*, 29:4, 1053-1073
- Santos, J. M. (2015). REDES NEURONAIS Conceitos. [Online] Disponível: [http://www.isep.ipp.pt/files/Redes%20Neuronais%20-%20Conceitos%20%20JMS%20\(vers%C3%A3o\\_final\).pdf](http://www.isep.ipp.pt/files/Redes%20Neuronais%20-%20Conceitos%20%20JMS%20(vers%C3%A3o_final).pdf) [Consultado: 18-Set-2018]
- SEOS. Introduction to Remote Sensing. Classification. [Online] Disponível: <http://www.seos-project.eu/modules/remotesensing/remotesensing-c06-p03.html> [Consultado: 17-Set-2018]
- Trigg, S., & Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 2641–2647

## ANEXO A

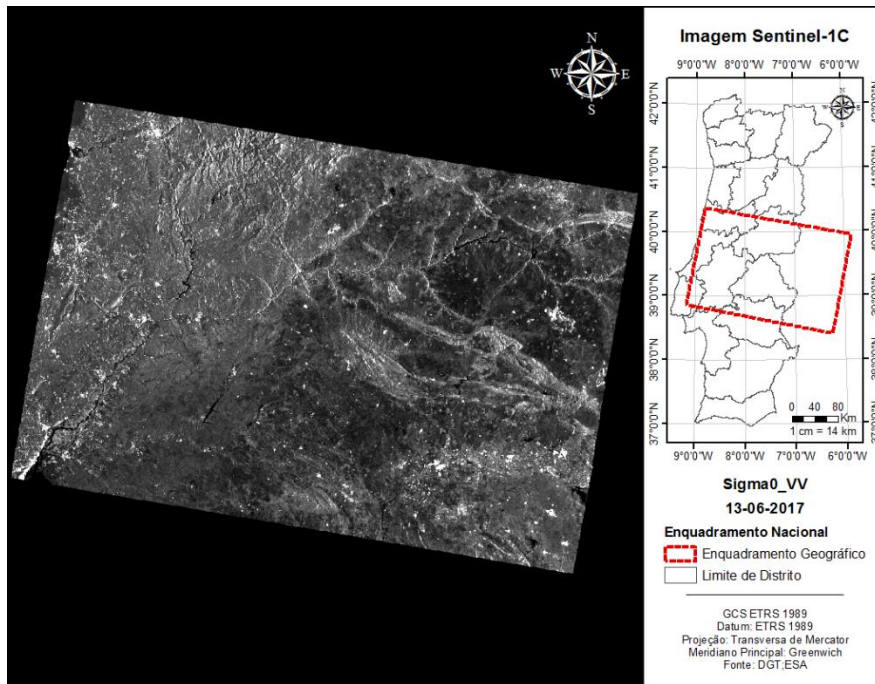


**Figura 26:** Imagem captada pelo satélite SPOT-7 da área de estudo.

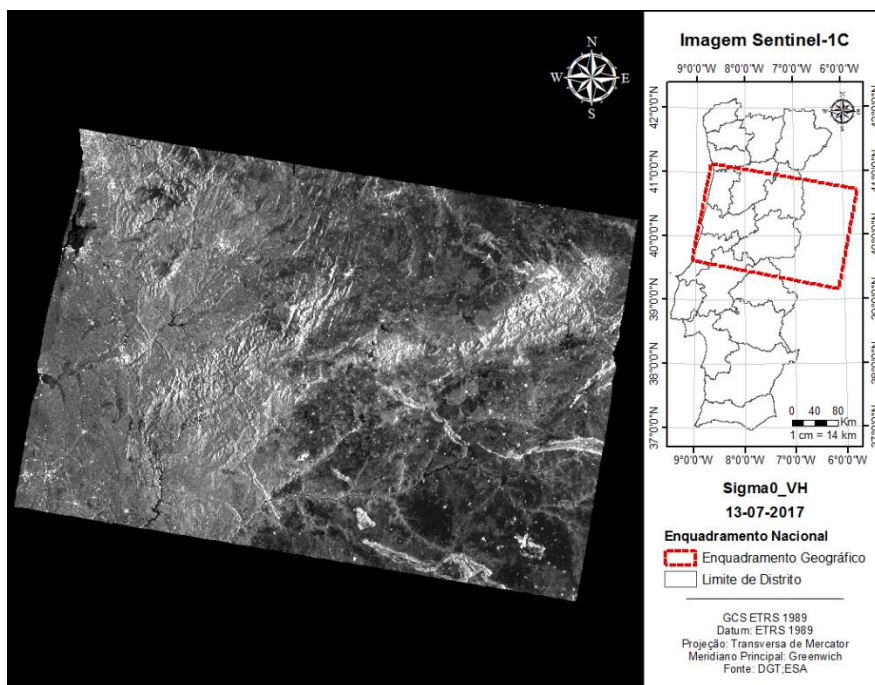


**Figura 27:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0\_VH) da área de interesse de dia 13 de junho de 2017.

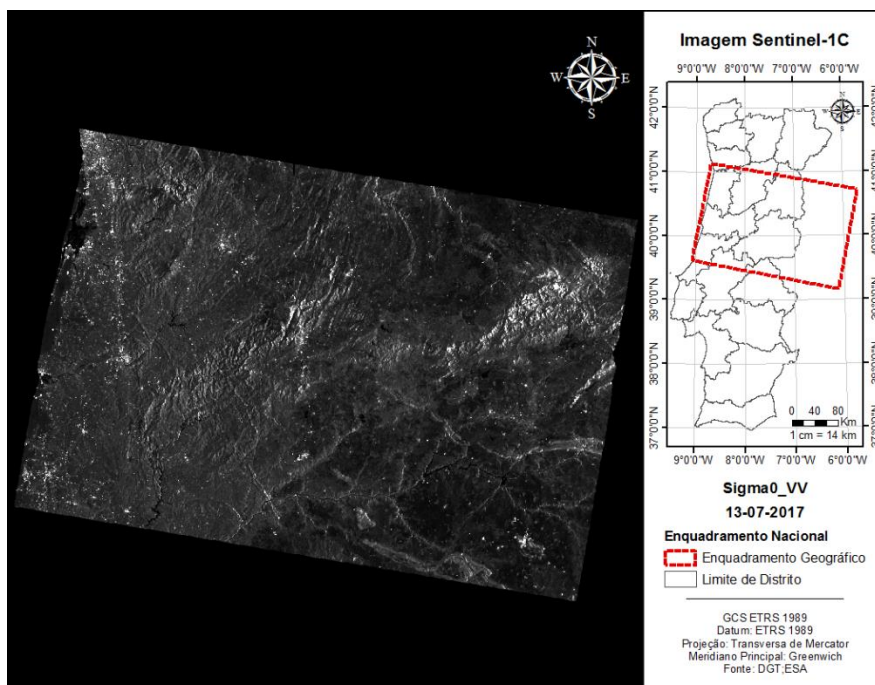




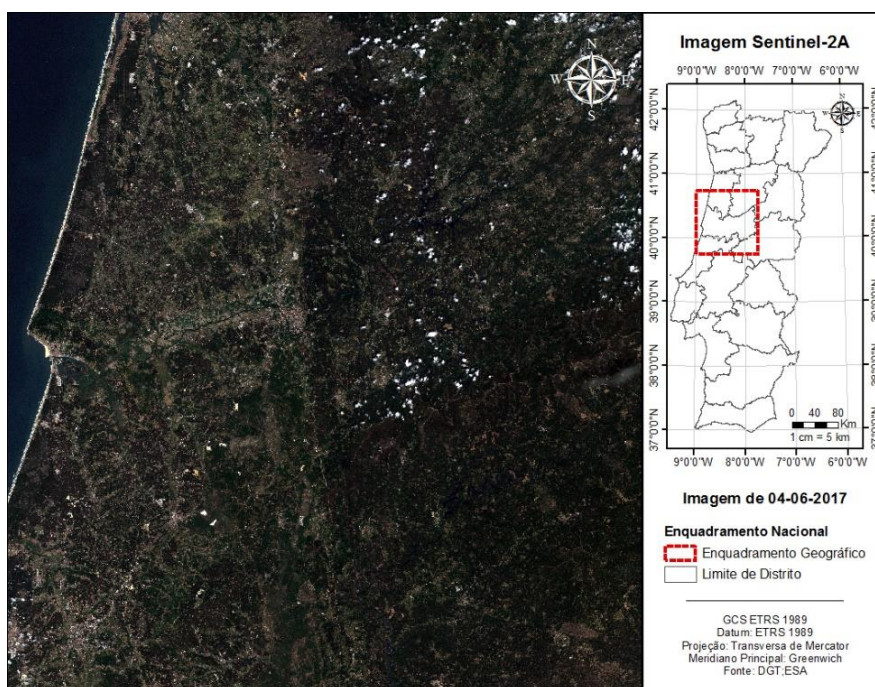
**Figura 28:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0\_VV) da área de interesse de dia 13 de junho de 2017.



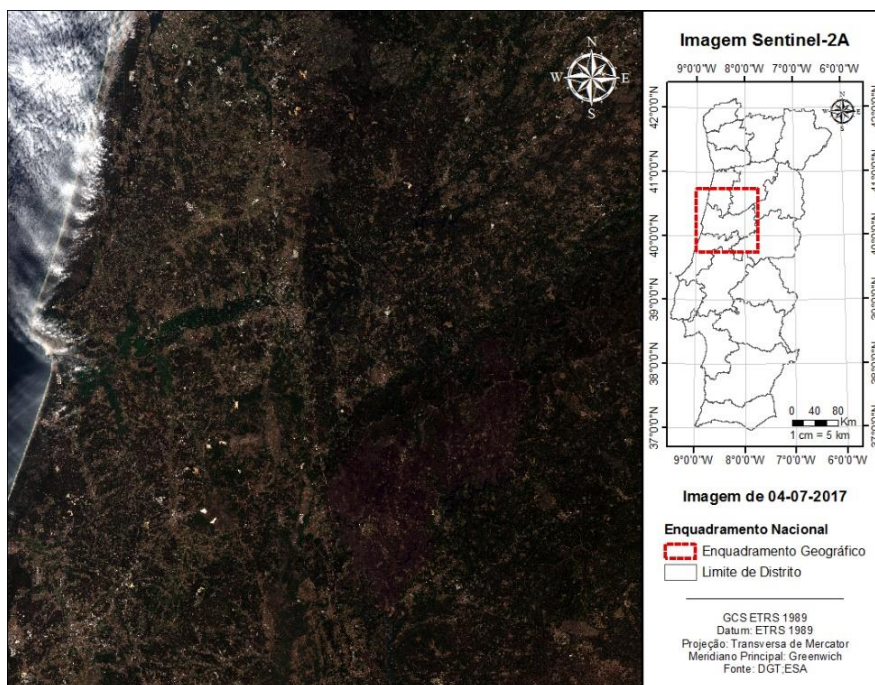
**Figura 29:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0\_VH) da área de interesse de dia 13 de julho de 2017.



**Figura 30:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-1C (Sigma0\_VV) da área de interesse de dia 13 de julho de 2017.



**Figura 31:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-2A da área de interesse de dia 4 de junho de 2017.



**Figura 32:** Imagem captada pelo satélite Sentinel-2A da área de interesse de dia 4 de julho de 2017.

## ANEXO B

**Tabela 32:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 (Nível-1C) |                |              |                   |                 | Razão – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|-----------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices   | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                  |            | Omissão (%) |            |
|                       |                |              |                   |                 | Ardido                        | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                   | M1.0           | 94,56        | 85,43             | 99,13           | 19,26                         | 0,27       | 0,87        | 6,75       |
|                       | M1.2           | 89,71        | 74,27             | 88,08           | 18,09                         | 0,23       | 0,73        | 5,55       |
|                       | M1.5           | 85,13        | 64,86             | 73,89           | 11,21                         | 0,20       | 0,61        | 2,66       |
|                       | M1.8           | 74,65        | 46,21             | 43,62           | 4,69                          | 0,16       | 0,46        | 0,61       |
| NB                    | M2.0           | 95,31        | 87,03             | 95,86           | 15,05                         | 1,23       | 4,14        | 4,84       |
|                       | M2.2           | 91,84        | 78,60             | 87,35           | 18,16                         | 0,47       | 1,54        | 5,53       |
|                       | M2.5           | 87,29        | 69,00             | 80,73           | 18,87                         | 0,24       | 0,74        | 5,36       |
|                       | M2.8           | 77,03        | 52,07             | 70,60           | 18,71                         | 0,12       | 0,32        | 4,64       |
| NBM                   | M3.0           | 95,73        | 88,23             | 97,33           | 14,54                         | 0,79       | 2,67        | 4,72       |
|                       | M3.2           | 91,83        | 78,83             | 90,61           | 18,02                         | 0,33       | 1,07        | 5,68       |
|                       | M3.5           | 87,69        | 70,24             | 85,61           | 17,29                         | 0,19       | 0,58        | 5,11       |
|                       | M3.8           | 78,12        | 53,89             | 70,67           | 11,24                         | 0,10       | 0,29        | 2,55       |
| ALL                   | M4.0           | 95,96        | 88,88             | 98,13           | 14,27                         | 0,56       | 1,87        | 4,66       |
|                       | M4.2           | 90,17        | 75,20             | 87,20           | 15,48                         | 0,33       | 1,06        | 4,56       |
|                       | M4.5           | 86,78        | 68,25             | 80,82           | 14,91                         | 0,23       | 0,72        | 4,04       |
|                       | M4.8           | 80,97        | 57,69             | 69,32           | 12,72                         | 0,16       | 0,46        | 2,88       |
| 3B                    | M5.0           | 95,49        | 87,56             | 96,76           | 14,99                         | 0,96       | 3,24        | 4,87       |
|                       | M5.2           | 88,38        | 71,01             | 80,87           | 19,65                         | 0,29       | 0,94        | 5,64       |
|                       | M5.5           | 82,37        | 59,59             | 70,30           | 19,89                         | 0,18       | 0,54        | 4,98       |
|                       | M5.8           | 70,21        | 41,31             | 46,44           | 11,92                         | 0,10       | 0,27        | 1,79       |
| 5S                    | M6.0           | 95,57        | 87,92             | 98,61           | 15,84                         | 0,42       | 1,39        | 5,30       |
|                       | M6.2           | 93,64        | 83,18             | 95,28           | 15,76                         | 0,40       | 1,30        | 5,09       |
|                       | M6.5           | 91,51        | 78,11             | 88,71           | 14,89                         | 0,36       | 1,16        | 4,43       |
|                       | M6.8           | 86,65        | 67,44             | 72,36           | 9,31                          | 0,29       | 0,91        | 2,12       |



**Tabela 33:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 (Nível-1C) |                |              |                   |                 | Diferença – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|-----------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices   | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                      |            | Omissão (%) |            |
|                       |                |              |                   |                 | Ardido                            | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                   | m1.0           | 91,68        | 78,61             | 98,98           | 26,93                             | 0,32       | 1,02        | 10,41      |
|                       | m1.2           | 84,37        | 64,30             | 85,22           | 18,87                             | 0,24       | 0,71        | 5,65       |
|                       | m1.5           | 73,87        | 47,68             | 62,35           | 6,21                              | 0,15       | 0,42        | 1,18       |
|                       | m1.8           | 54,47        | 24,36             | 21,34           | 2,47                              | 0,10       | 0,22        | 0,15       |
| NB                    | m2.0           | 94,90        | 86,24             | 98,73           | 18,02                             | 0,38       | 1,27        | 6,19       |
|                       | m2.2           | 87,51        | 69,68             | 85,19           | 21,09                             | 0,20       | 0,61        | 6,50       |
|                       | m2.5           | 76,10        | 50,13             | 63,16           | 16,44                             | 0,11       | 0,31        | 3,55       |
|                       | m2.8           | 53,99        | 24,53             | 25,10           | 7,91                              | 0,05       | 0,11        | 0,62       |
| NBM                   | m3.0           | 96,11        | 89,25             | 97,89           | 13,60                             | 0,63       | 2,11        | 4,39       |
|                       | m3.2           | 90,78        | 76,85             | 91,01           | 13,24                             | 0,19       | 0,62        | 3,96       |
|                       | m3.5           | 83,91        | 63,03             | 75,56           | 11,20                             | 0,10       | 0,30        | 2,72       |
|                       | m3.8           | 67,76        | 37,26             | 34,24           | 5,37                              | 0,05       | 0,13        | 0,55       |
| ALL                   | m4.0           | 92,82        | 81,28             | 99,26           | 24,15                             | 0,23       | 0,74        | 9,02       |
|                       | m4.2           | 80,98        | 58,27             | 79,33           | 22,74                             | 0,13       | 0,36        | 6,66       |
|                       | m4.5           | 72,06        | 44,82             | 60,48           | 19,55                             | 0,09       | 0,24        | 4,19       |
|                       | m4.8           | 58,02        | 27,87             | 28,33           | 9,04                              | 0,06       | 0,14        | 0,80       |
| 3B                    | m5.0           | 94,04        | 84,14             | 98,83           | 20,62                             | 0,36       | 1,17        | 7,32       |
|                       | m5.2           | 85,13        | 65,40             | 88,08           | 26,70                             | 0,17       | 0,51        | 9,15       |
|                       | m5.5           | 73,70        | 47,56             | 64,68           | 11,91                             | 0,11       | 0,30        | 2,49       |
|                       | m5.8           | 51,63        | 21,36             | 13,84           | 1,30                              | 0,07       | 0,14        | 0,05       |
| 5S                    | m6.0           | 94,00        | 84,09             | 99,24           | 20,92                             | 0,23       | 0,76        | 7,49       |
|                       | m6.2           | 84,85        | 65,04             | 81,72           | 13,49                             | 0,19       | 0,58        | 3,63       |
|                       | m6.5           | 75,75        | 49,57             | 59,57           | 8,55                              | 0,12       | 0,35        | 1,59       |
|                       | m6.8           | 61,30        | 30,08             | 25,21           | 3,02                              | 0,07       | 0,19        | 0,22       |

**Tabela 34:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1          |                |              |                   |                 | Razão – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|---------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                  |            | Omissão (%) |            |
|                     |                |              |                   |                 | Ardido                        | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| VH+VV               | L1.0           | 72,62        | 32,10             | 61,78           | 57,98                         | 12,57      | 38,22       | 24,29      |
|                     | L1.2           | 65,79        | 23,51             | 48,67           | 63,05                         | 12,28      | 34,73       | 23,66      |
|                     | L1.5           | 48,85        | 11,51             | 30,84           | 70,36                         | 11,82      | 25,41       | 20,86      |
|                     | L1.8           | 21,60        | 2,77              | 12,74           | 78,56                         | 11,12      | 10,59       | 13,30      |

**Tabela 35:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1          |                |              |                   |                 | Diferença – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|---------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                      |            | Omissão (%) |            |
|                     |                |              |                   |                 | Ardido                            | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| VH+VV               | 11.0           | 73,09        | 32,82             | 61,75           | 57,34                             | 12,51      | 38,25       | 23,68      |
|                     | 11.2           | 66,34        | 24,20             | 48,82           | 62,48                             | 12,20      | 34,74       | 23,19      |
|                     | 11.5           | 49,15        | 11,79             | 31,04           | 70,14                             | 11,69      | 25,20       | 20,80      |
|                     | 11.8           | 20,87        | 2,65              | 12,65           | 78,99                             | 10,79      | 9,84        | 13,56      |

**Tabela 36:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |                |              |                   |                 | Razão – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices                | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                  |            | Omissão (%) |            |
|                                    |                |              |                   |                 | Ardido                        | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                                | E1.0           | 94,72        | 85,83             | 99,21           | 18,83                         | 0,24       | 0,79        | 6,57       |
|                                    | E1.2           | 88,55        | 71,71             | 84,33           | 18,38                         | 0,20       | 0,63        | 5,42       |
|                                    | E1.5           | 79,73        | 54,99             | 62,88           | 16,32                         | 0,17       | 0,49        | 3,50       |
|                                    | E1.8           | 59,66        | 29,47             | 30,76           | 8,30                          | 0,12       | 0,30        | 0,79       |
| NB                                 | E2.0           | 95,44        | 87,40             | 96,45           | 14,98                         | 1,05       | 3,55        | 4,85       |
|                                    | E2.2           | 90,36        | 75,18             | 83,56           | 17,92                         | 0,48       | 1,57        | 5,21       |
|                                    | E2.5           | 78,90        | 53,94             | 65,48           | 19,43                         | 0,23       | 0,68        | 4,51       |
|                                    | E2.8           | 53,38        | 25,56             | 37,70           | 19,48                         | 0,12       | 0,24        | 2,60       |
| NBM                                | E3.0           | 95,76        | 88,31             | 97,49           | 14,55                         | 0,75       | 2,51        | 4,74       |
|                                    | E3.2           | 91,14        | 77,16             | 87,77           | 17,90                         | 0,35       | 1,13        | 5,46       |
|                                    | E3.5           | 82,55        | 60,30             | 73,47           | 18,17                         | 0,18       | 0,55        | 4,65       |
|                                    | E3.8           | 62,29        | 33,68             | 46,81           | 15,17                         | 0,10       | 0,22        | 2,39       |
| ALL                                | E4.0           | 95,95        | 88,87             | 98,32           | 14,41                         | 0,50       | 1,68        | 4,72       |
|                                    | E4.2           | 89,93        | 74,67             | 86,56           | 15,65                         | 0,30       | 0,96        | 4,58       |
|                                    | E4.5           | 85,55        | 65,74             | 77,28           | 15,33                         | 0,20       | 0,63        | 3,99       |
|                                    | E4.8           | 76,69        | 50,50             | 59,00           | 13,49                         | 0,13       | 0,38        | 2,63       |
| 3B                                 | E5.0           | 95,56        | 87,75             | 96,98           | 14,90                         | 0,90       | 3,02        | 4,85       |
|                                    | E5.2           | 87,93        | 69,93             | 78,28           | 19,78                         | 0,30       | 0,96        | 5,51       |
|                                    | E5.5           | 77,87        | 51,83             | 59,62           | 20,37                         | 0,17       | 0,50        | 4,35       |
|                                    | E5.8           | 56,69        | 27,00             | 31,03           | 18,81                         | 0,10       | 0,21        | 2,05       |
| 5S                                 | E6.0           | 95,83        | 88,57             | 98,56           | 14,97                         | 0,43       | 1,44        | 4,95       |
|                                    | E6.2           | 93,41        | 82,58             | 93,44           | 15,04                         | 0,40       | 1,32        | 4,72       |
|                                    | E6.5           | 89,19        | 72,78             | 80,85           | 14,80                         | 0,34       | 1,10        | 4,01       |
|                                    | E6.8           | 78,48        | 52,38             | 54,67           | 12,22                         | 0,25       | 0,75        | 2,17       |

**Tabela 37:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de máxima verosimilhança para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |                |              |                   |                 | Diferença – Máxima Verosimilhança |            |             |            |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices                | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)                      |            | Omissão (%) |            |
|                                    |                |              |                   |                 | Ardido                            | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                                | e1.0           | 91,79        | 78,89             | 99,04           | 26,66                             | 0,30       | 0,96        | 10,27      |
|                                    | e1.2           | 83,99        | 63,19             | 80,73           | 20,00                             | 0,25       | 0,74        | 5,76       |
|                                    | e1.5           | 70,63        | 42,75             | 55,04           | 14,71                             | 0,15       | 0,40        | 2,71       |
|                                    | e1.8           | 46,15        | 18,94             | 19,51           | 4,24                              | 0,09       | 0,18        | 0,25       |
| NB                                 | e2.0           | 94,98        | 86,45             | 98,81           | 17,82                             | 0,36       | 1,19        | 6,11       |
|                                    | e2.2           | 86,99        | 68,37             | 80,94           | 21,24                             | 0,21       | 0,65        | 6,23       |
|                                    | e2.5           | 71,49        | 43,39             | 54,51           | 20,31                             | 0,12       | 0,32        | 3,96       |
|                                    | e2.8           | 43,08        | 17,46             | 21,76           | 15,08                             | 0,06       | 0,10        | 1,10       |
| NBM                                | e3.0           | 96,17        | 89,40             | 97,97           | 13,46                             | 0,60       | 2,03        | 4,35       |
|                                    | e3.2           | 89,95        | 74,80             | 86,43           | 13,63                             | 0,22       | 0,71        | 3,89       |
|                                    | e3.5           | 79,45        | 54,99             | 64,61           | 12,65                             | 0,11       | 0,31        | 2,67       |
|                                    | e3.8           | 56,96        | 27,15             | 28,82           | 9,18                              | 0,05       | 0,12        | 0,83       |
| ALL                                | e4.0           | 92,74        | 81,09             | 99,34           | 24,40                             | 0,21       | 0,66        | 9,15       |
|                                    | e4.2           | 80,88        | 57,87             | 77,50           | 24,08                             | 0,11       | 0,33        | 7,01       |
|                                    | e4.5           | 70,94        | 42,83             | 55,64           | 22,77                             | 0,08       | 0,21        | 4,68       |
|                                    | e4.8           | 55,47        | 25,37             | 24,50           | 12,64                             | 0,05       | 0,12        | 1,01       |
| 3B                                 | e5.0           | 94,03        | 84,11             | 98,93           | 20,71                             | 0,33       | 1,07        | 7,37       |
|                                    | e5.2           | 84,66        | 64,09             | 82,98           | 27,82                             | 0,17       | 0,50        | 9,12       |
|                                    | e5.5           | 70,38        | 42,14             | 56,48           | 25,99                             | 0,11       | 0,27        | 5,66       |
|                                    | e5.8           | 44,31        | 17,52             | 16,74           | 6,16                              | 0,06       | 0,11        | 0,31       |
| 5S                                 | e6.0           | 94,10        | 84,34             | 99,29           | 20,66                             | 0,22       | 0,71        | 7,38       |
|                                    | e6.2           | 84,71        | 64,50             | 79,05           | 14,83                             | 0,18       | 0,56        | 3,93       |
|                                    | e6.5           | 74,11        | 46,74             | 53,87           | 10,79                             | 0,12       | 0,33        | 1,86       |
|                                    | e6.8           | 56,31        | 25,64             | 21,54           | 5,42                              | 0,07       | 0,16        | 0,35       |

**Tabela 38:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 (Nível-1C) |                |              |                   |                 | Razão – Rede Neuronal |            |             |            |
|-----------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices   | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)          |            | Omissão (%) |            |
|                       |                |              |                   |                 | Ardido                | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                   | R1.1           | 96,47        | 90,07             | 96,17           | 11,16                 | 1,12       | 3,83        | 3,45       |
|                       | R1.2           | 96,39        | 89,62             | 92,68           | 8,79                  | 2,10       | 7,32        | 2,55       |
|                       | R1.3           | 96,39        | 89,62             | 92,68           | 8,79                  | 2,10       | 7,32        | 2,55       |
|                       | R1.4           | 91,84        | 73,34             | 65,69           | 3,60                  | 8,97       | 34,31       | 0,70       |
|                       | R1.5           | 22,22        | 0,01              | 100,00          | 77,80                 | 0,03       | 0,00        | 99,98      |
|                       | R1.6           | 24,50        | 1,33              | 99,99           | 77,28                 | 0,08       | 0,01        | 97,05      |
| NB                    | R2.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R2.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R2.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R2.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R2.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R2.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| NBM                   | R3.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 75,00      | 0,00        | 100,00     |
|                       | R3.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R3.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R3.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R3.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R3.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| ALL                   | R4.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 15,38      | 0,00        | 100,00     |
|                       | R4.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R4.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R4.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R4.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R4.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 2,19       | 0,00        | 100,00     |
| 3B                    | R5.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R5.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R5.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R5.4           | 93,46        | 79,51             | 74,65           | 5,22                  | 6,82       | 25,35       | 1,17       |
|                       | R5.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R5.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| 5S                    | R6.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R6.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R6.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R6.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R6.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | R6.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |



**Tabela 39:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2.

| Sentinel-2 (Nível-1C) |                |              |                   |                 | Diferença – Rede Neuronal |            |             |            |
|-----------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|---------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices   | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)              |            | Omissão (%) |            |
|                       |                |              |                   |                 | Ardido                    | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                   | r1.1           | 22,38        | 0,10              | 100,00          | 77,76                     | 0,10       | 0,00        | 99,77      |
|                       | r1.2           | 22,25        | 0,03              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,94      |
|                       | r1.3           | 22,25        | 0,03              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,94      |
|                       | r1.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r1.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r1.6           | 77,80        | 0,00              | 0,00            | 100,00                    | 22,20      | 100,00      | 0,00       |
| NB                    | r2.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r2.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r2.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r2.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r2.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r2.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 13,65      | 0,00        | 100,00     |
| NBM                   | r3.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 49,46      | 0,00        | 100,00     |
|                       | r3.2           | 96,98        | 91,36             | 94,95           | 8,27                      | 1,45       | 5,05        | 2,44       |
|                       | r3.3           | 96,98        | 91,36             | 94,95           | 8,27                      | 1,45       | 5,05        | 2,44       |
|                       | r3.4           | 92,63        | 76,18             | 68,76           | 2,74                      | 8,23       | 31,24       | 0,55       |
|                       | r3.5           | 96,81        | 91,09             | 97,78           | 11,04                     | 0,65       | 2,22        | 3,46       |
|                       | r3.6           | 96,92        | 91,34             | 97,28           | 10,30                     | 0,79       | 2,72        | 3,19       |
| ALL                   | r4.1           | 96,98        | 91,46             | 96,65           | 9,61                      | 0,97       | 3,35        | 2,93       |
|                       | r4.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r4.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r4.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r4.5           | 22,27        | 0,04              | 100,00          | 77,79                     | 0,06       | 0,00        | 99,91      |
|                       | r4.6           | 77,80        | 0,00              | 0,00            | 100,00                    | 22,20      | 100,00      | 0,00       |
| 3B                    | r5.1           | 23,44        | 0,71              | 99,99           | 77,52                     | 0,20       | 0,01        | 98,41      |
|                       | r5.2           | 22,22        | 0,01              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 99,97      |
|                       | r5.3           | 22,22        | 0,01              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 99,97      |
|                       | r5.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r5.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                       | r5.6           | 94,35        | 82,27             | 76,51           | 2,52                      | 6,32       | 23,49       | 0,57       |
| 5S                    | r6.1           | 93,41        | 82,58             | 98,45           | 22,23                     | 0,48       | 1,55        | 8,03       |
|                       | r6.2           | 92,93        | 81,53             | 99,17           | 23,82                     | 0,26       | 0,83        | 8,85       |
|                       | r6.3           | 92,93        | 81,53             | 99,17           | 23,82                     | 0,26       | 0,83        | 8,85       |
|                       | r6.4           | 96,85        | 91,19             | 97,91           | 11,01                     | 0,61       | 2,09        | 3,46       |
|                       | r6.5           | 96,33        | 89,87             | 98,66           | 13,35                     | 0,40       | 1,34        | 4,34       |
|                       | r6.6           | 22,22        | 0,01              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,97      |

**Tabela 40:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1          |                |              |                   |                 | Razão – Rede Neuronal |            |             |            |
|---------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)          |            | Omissão (%) |            |
|                     |                |              |                   |                 | Ardido                | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| VH+VV               | A1.1           | 68,59        | 29,85             | 70,73           | 61,37                 | 10,93      | 29,27       | 32,01      |
|                     | A1.2           | 74,45        | 30,07             | 50,59           | 56,54                 | 14,77      | 49,41       | 18,75      |
|                     | A1.3           | 74,45        | 30,07             | 50,59           | 56,54                 | 14,77      | 49,41       | 18,75      |
|                     | A1.4           | 40,15        | 8,88              | 91,35           | 74,10                 | 8,80       | 8,65        | 74,44      |
|                     | A1.5           | 70,49        | 27,92             | 59,49           | 60,88                 | 13,55      | 40,51       | 26,38      |
|                     | A1.6           | 22,17        | 0,00              | 100,00          | 77,83                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |

**Tabela 41:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-1.

| Sentinel-1          |                |              |                   |                 | Diferença – Rede Neuronal |            |             |            |
|---------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|---------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)              |            | Omissão (%) |            |
|                     |                |              |                   |                 | Ardido                    | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| VH+VV               | a1.1           | 69,83        | 30,88             | 68,96           | 60,34                     | 11,22      | 31,04       | 29,92      |
|                     | a1.2           | 28,14        | 2,84              | 97,82           | 76,68                     | 6,99       | 2,18        | 91,73      |
|                     | a1.3           | 28,14        | 2,84              | 97,82           | 76,68                     | 6,99       | 2,18        | 91,73      |
|                     | a1.4           | 37,24        | 7,41              | 93,29           | 74,74                     | 8,26       | 6,71        | 78,75      |
|                     | a1.5           | 53,15        | 16,45             | 81,70           | 70,24                     | 10,39      | 18,30       | 55,00      |
|                     | a1.6           | 64,65        | 24,24             | 69,48           | 64,95                     | 12,09      | 30,52       | 36,73      |

**Tabela 42:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a razão, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2 (Nível-1C) e Sentinel-1 |                |              |                   |                 | Razão – Rede Neuronal |            |             |            |
|------------------------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices                | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)          |            | Omissão (%) |            |
|                                    |                |              |                   |                 | Ardido                | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                                | N1.1           | 55,74        | 25,16             | 99,95           | 66,60                 | 0,03       | 0,05        | 56,87      |
|                                    | N1.2           | 90,08        | 75,20             | 99,68           | 30,79                 | 0,11       | 0,32        | 12,65      |
|                                    | N1.3           | 90,08        | 75,20             | 99,68           | 30,79                 | 0,11       | 0,32        | 12,65      |
|                                    | N1.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N1.5           | 92,50        | 80,56             | 99,55           | 25,10                 | 0,14       | 0,45        | 9,52       |
|                                    | N1.6           | 95,22        | 85,53             | 83,09           | 5,26                  | 4,66       | 16,91       | 1,32       |
| NB                                 | N2.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N2.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N2.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N2.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N2.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N2.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| NBM                                | N3.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N3.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N3.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N3.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N3.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N3.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| ALL                                | N4.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N4.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N4.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N4.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N4.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N4.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| 3B                                 | N5.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N5.2           | 28,70        | 3,88              | 99,98           | 76,26                 | 0,07       | 0,02        | 91,64      |
|                                    | N5.3           | 28,70        | 3,88              | 99,98           | 76,26                 | 0,07       | 0,02        | 91,64      |
|                                    | N5.4           | 96,28        | 89,52             | 95,45           | 11,34                 | 1,33       | 4,55        | 3,48       |
|                                    | N5.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N5.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| 5S                                 | N6.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N6.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N6.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N6.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N6.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                    | N6.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                 | 0,00       | 0,00        | 100,00     |

**Tabela 43:** Valores dos testes efetuados com o algoritmo de rede neuronal para a diferença, onde está expresso a exatidão global, coeficiente k, áreas ardidas, erros de comissão e omissão com base em imagens Sentinel-2 e Sentinel-1.

| Sentinel-2A (Nível-1C) e Sentinel-1 |                |              |                   |                 | Diferença – Rede Neuronal |            |             |            |
|-------------------------------------|----------------|--------------|-------------------|-----------------|---------------------------|------------|-------------|------------|
| Conjunto de Índices                 | Designação (%) | Exatidão (%) | Coeficiente k (%) | Área Ardida (%) | Comissão (%)              |            | Omissão (%) |            |
|                                     |                |              |                   |                 | Ardido                    | Não Ardido | Ardido      | Não Ardido |
| NGB                                 | n1.1           | 22,32        | 0,07              | 100,00          | 77,77                     | 0,07       | 0,00        | 99,84      |
|                                     | n1.2           | 22,23        | 0,02              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,96      |
|                                     | n1.3           | 22,23        | 0,02              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,96      |
|                                     | n1.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n1.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n1.6           | 77,80        | 0,00              | 0,00            | 0,00                      | 22,20      | 100,00      | 0,00       |
| NB                                  | n2.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 9,09       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n2.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n2.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n2.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n2.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n2.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
| NBM                                 | n3.1           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 9,71       | 0,00        | 99,99      |
|                                     | n3.2           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n3.3           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n3.4           | 97,04        | 91,58             | 95,63           | 8,56                      | 1,26       | 4,37        | 2,55       |
|                                     | n3.5           | 97,04        | 91,61             | 96,17           | 8,97                      | 1,11       | 3,83        | 2,71       |
|                                     | n3.6           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 66,67      | 0,00        | 100,00     |
| ALL                                 | n4.1           | 22,53        | 0,19              | 100,00          | 77,73                     | 0,24       | 0,00        | 99,57      |
|                                     | n4.2           | 22,25        | 0,03              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,94      |
|                                     | n4.3           | 22,25        | 0,03              | 100,00          | 77,79                     | 0,00       | 0,00        | 99,94      |
|                                     | n4.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n4.5           | 95,91        | 87,63             | 84,90           | 3,78                      | 4,17       | 15,10       | 0,95       |
|                                     | n4.6           | 77,80        | 0,00              | 0,00            | 0,00                      | 22,20      | 100,00      | 0,00       |
| 3B                                  | n5.1           | 22,35        | 0,09              | 100,00          | 77,77                     | 0,16       | 0,00        | 99,80      |
|                                     | n5.2           | 22,21        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 99,99      |
|                                     | n5.3           | 22,21        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 99,99      |
|                                     | n5.4           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n5.5           | 22,20        | 0,00              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 100,00     |
|                                     | n5.6           | 89,74        | 64,61             | 54,37           | 1,04                      | 11,54      | 45,63       | 0,16       |
| 5S                                  | n6.1           | 95,33        | 87,31             | 98,69           | 16,66                     | 0,40       | 1,31        | 5,63       |
|                                     | n6.2           | 93,83        | 83,48             | 97,59           | 20,66                     | 0,74       | 2,41        | 7,25       |
|                                     | n6.3           | 93,83        | 83,48             | 97,59           | 20,66                     | 0,74       | 2,41        | 7,25       |
|                                     | n6.4           | 96,88        | 91,28             | 97,77           | 10,77                     | 0,65       | 2,23        | 3,37       |
|                                     | n6.5           | 96,79        | 90,93             | 96,05           | 9,85                      | 1,15       | 3,95        | 2,99       |
|                                     | n6.6           | 22,22        | 0,01              | 100,00          | 77,80                     | 0,00       | 0,00        | 99,98      |

